MAX

# NOVA

4 B

HAVO

Natuurkunde



MALMBERG

NAAM EN KLAS:




# NATUURKUNDE

## 4 HAVO

## Deel B

**Auteurs**

Rick Cremers

Louis Lenders

François Molin

**Eindredactie**

Emile Verstraelen

**Met medewerking van**

Fons Alkemade

Bart-Jan van Lierop



Release 2021

Malmberg 's-Hertogenbosch

www.malmberg.nl/nova-natuurkunde

# Inhoud Deel A

# Inhoud Deel B



*keuzestof schoolexamen

# Voorwoord

*Nova* is op zo'n manier opgebouwd, dat je de stof vanuit verschillende invalshoeken kunt benaderen. Elk hoofdstuk bestaat namelijk uit drie delen:
**P**: de praktijk; voorbeelden van toepassingen van de theorie.
**T**: de theorie; uitleg over natuurkundige concepten, modellen en experimenten. Aan het begin van iedere paragraaf staan leerdoelen vermeld. Deze zijn afgeleid van de eindtermen uit de syllabus, waarin staat wat je voor je centraal examen allemaal moet kunnen. Ook de keuzehoofdstukken (voor de schoolexamens) hebben leerdoelen.
**M**: de maatschappij; waarom is kennis van de theorie belangrijk voor jou, als onderdeel van die maatschappij?
Bij alle drie de delen horen opdrachten.

## Jouw eigen werkwijze

Je begint elk hoofdstuk met enkele oriënterende opdrachten in het boek. Deze opdrachten gaan over stof die je al eerder hebt geleerd en die je weer nodig hebt bij dit hoofdstuk. Wil je meer oefenen met voorkennis? Maak dan ook de digitale voorkennistoets. Vanzelfsprekend bepaal je samen met je docent hoe je de stof uit het hoofdstuk daarna gaat behandelen. Je kunt op verschillende manieren met *Nova* werken.

1 Vind je het belangrijk om eerst de **theoretische concepten** te bestuderen, om daarna te kijken hoe die theorie in de praktijk en de maatschappij wordt gebruikt? In dat geval begin je met het T-deel en doe je daarna het P-deel en een M-deel.
2 Ben je vooral geïnteresseerd in **toepassing**, begin dan met het P-deel. Daarna doe je het T-deel en een M-deel.
3 Wanneer je interesse vooral uitgaat naar het belang van natuurkunde voor de **maatschappij**, begin dan met een van de M-delen. De M-delen worden uitsluitend online aangeboden. Vervolgens doe je het P-deel of ga je direct naar het T-deel

Iedereen sluit af met het beantwoorden van de eindopdracht aan het einde van het T-deel. Indien je de theorie voldoende beheerst, moet je de opdrachten van het P-deel kunnen maken.

## Opdrachten

De opdrachten kennen een verschillende opbouw. Voor sommige opdrachten staat een **+**. Dat zijn extra pittige opdrachten. In een aantal paragrafen zijn examenopgaven opgenomen. Soms zijn ze bewerkt ('*naar'*), soms zijn ze letterlijk overgenomen ('*bron*'). Zo word je goed voorbereid voor het examen. Als er een staat, heb je te maken met een opdracht uit de natuurkunde-olympiade. Bij havo komt dat zelden voor, bij vwo gebeurt dat vaker. Dit zijn uitdagende opdrachten waarvoor je de theorie vaak op net een andere manier moet toepassen.

## Oefenen

Was je in staat de opdrachten van het P-deel op te lossen, maar wil je toch nog kijken of je de stof echt beheerst? Maak dan de **Test jezelf**. Besef dat de **onthoud!** aan het einde van de paragraaf slechts dient om de kern van de paragraaf nog eens aan te geven. Deze samenvattingen volstaan NIET om een toets voor te bereiden. Om te controleren of je de begrippen uit dit hoofdstuk beheerst, kun je de online **flitskaarten** gebruiken.

Wij wensen je succes en plezier met *Nova*!

De auteurs



HOOFDSTUK 4

# Materialen

Als je voorwerpen om je heen bekijkt, kun je je afvragen waarom die van bepaalde materialen zijn gemaakt. Ofwel: wat zijn de eigenschappen die de betreffende materialen daarvoor geschikt maken? Waarom bezitten stoffen de eigenschappen die ze hebben? Door verschillende stoffen te mengen of ze op een bepaalde manier te verbinden, zijn bepaalde eigenschappen te verbeteren. In dit hoofdstuk leer je daar meer over.

## Introductie



## Praktijk



## Theorie



## Maatschappij

# Wat weet je al over materialen?

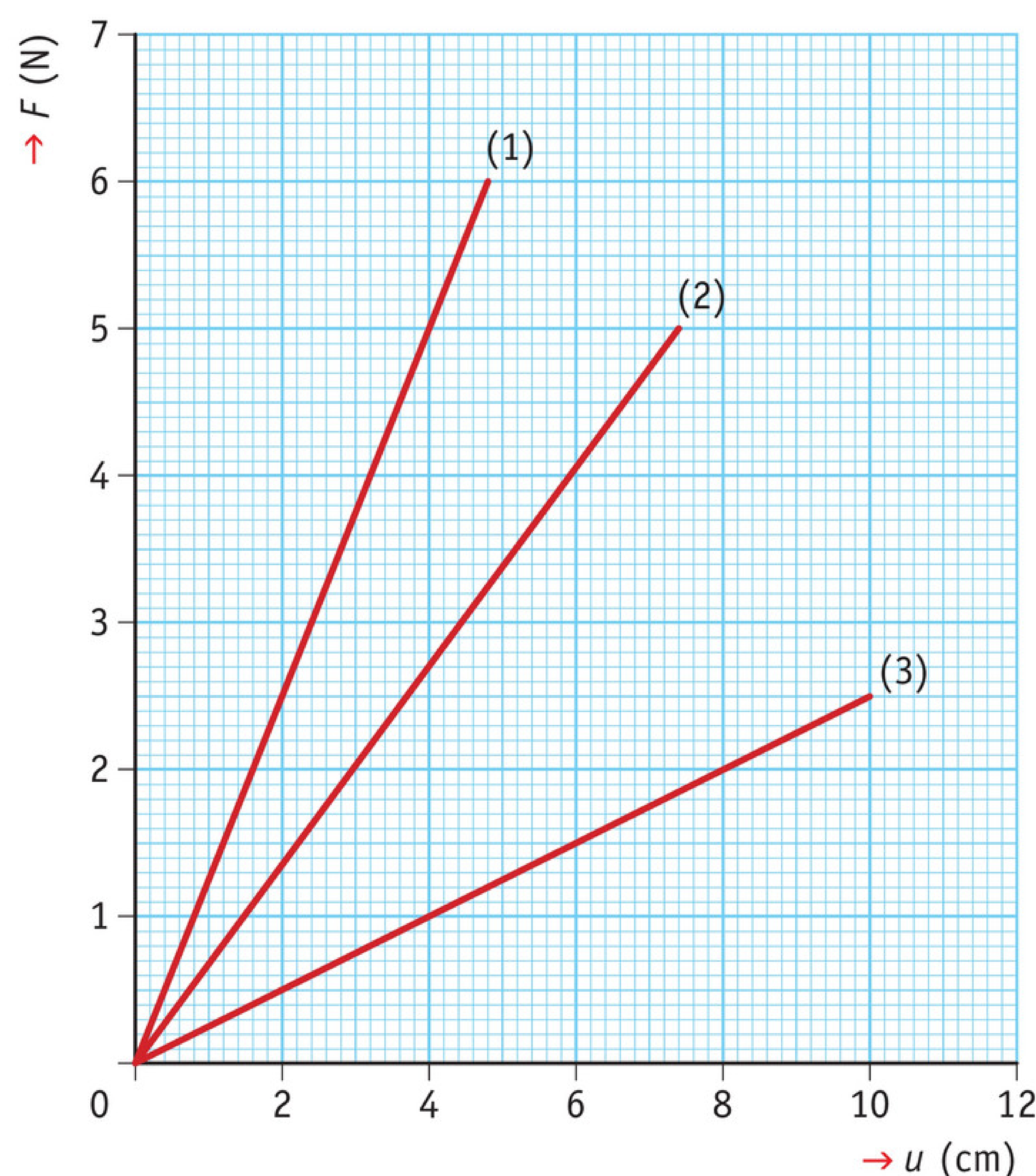
Leerdoelen
1 Je kunt de veerconstante van een veer bepalen.
2 Je kunt rekenen aan energieomzettingen.
3 Je kunt uitleggen dat de toevoer van warmte leidt tot een hogere temperatuur.
4 Je kunt rekenen met soortelijke warmte.
5 Je kunt uitleggen hoe de verschillende manieren van warmtetransport werken.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen over materialen geleerd. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

## Opdrachten voorkennis

**1** Een onbelaste veer is 5,1 cm lang. Als er een blokje aan hangt, is deze veer 10 cm lang.
De veerconstante is 0,20 N/cm.
Bereken de massa van het blokje.
De massa van het blokje is ________ kg.

**2** Nienke heeft van drie veren gemeten hoe ze uitrekken als ze er gewichtjes aan hangt.
Je ziet de grafiek van deze proef in afbeelding 1.
Welke veer is de slapste veer?
De slapste veer is veer *1* / *2* / *3*.




▲ **afbeelding 1** drie veren

**3** Een lamp van 16 W zet elke seconde 16 J elektrische energie om. Deze lamp produceert elke seconde 4 J stralingsenergie (licht).
Hoeveel joule aan warmte komt er elke seconde vrij?
De lamp produceert per seconde ________ J aan warmte.

**4** Sadiq gaat een ei koken. Als het water kookt, blijft de temperatuur van het water 100 °C.
Waardoor blijft de temperatuur van het water 100 °C?
Dit komt doordat de toegevoerde energie wordt gebruikt om de moleculen
*dichter bij elkaar te brengen* / *op gelijke afstand van elkaar te houden* /
*bij elkaar vandaan te laten bewegen*.

**5** Stephanie verwarmt 250 mL water van 15 °C tot 100 °C. De soortelijke warmte van water is 4,2 J/(g·°C).
Hoeveel warmte neemt het water daarbij op?
- ☐ 57 kJ
- ☐ 73 kJ
- ☐ 89 kJ
- ☐ 105 kJ

**6** Bekijk de foto van een huis dat is gefotografeerd met een warmtecamera (afbeelding 2).
Welke vorm van warmtetransport leg je vast met zo'n camera?
Dit is een voorbeeld van *geleiding* / *straling* / *stroming*.



▲ **afbeelding 2**

Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

Praktijk

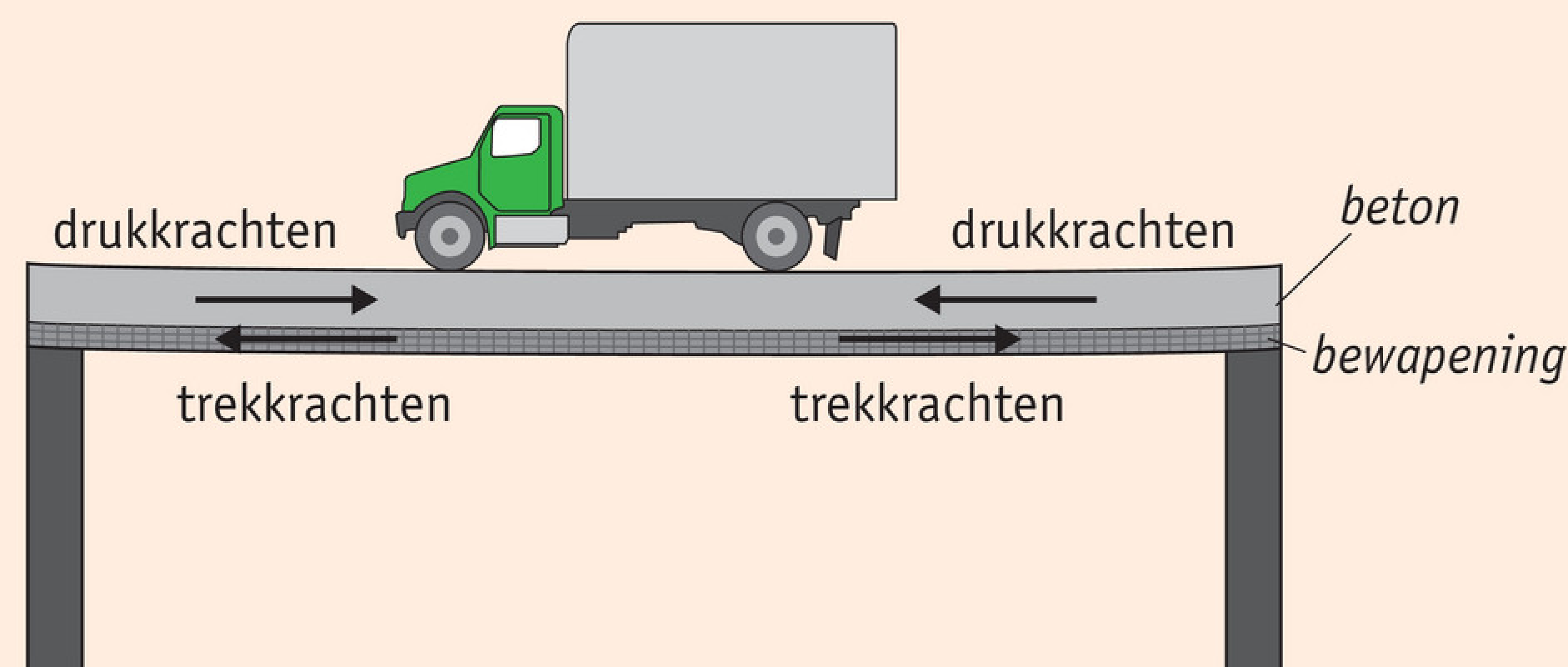
# Composieten

Kogelwerende vesten waren tot dertig jaar geleden gemaakt van staal. Agenten sleepten toen ruim vijfentwintig kilogram staal met zich mee, wat hen log en langzaam maakte. Vandaag de dag worden de vesten van de composiet aramide gemaakt. Deze vezelversterkte kunststofvesten zijn even sterk als de stalen vesten, maar zijn soepel, comfortabel en ruim tien keer lichter.



## Gewapend beton

Een composiet is een materiaal dat is samengesteld uit verschillende soorten materialen. Een bekend voorbeeld is gewapend beton, dat al in de tweede helft van de negentiende eeuw werd ontwikkeld in Frankrijk. Het is een combinatie van beton en staal. Beton zonder wapening is vanwege de korrelige structuur niet goed bestand tegen trekkrachten. Bij te grote trekkrachten gaat het beton scheuren.
Gewapend beton wordt onder andere gebruikt voor het wegdek van een brug. Als een brugdek wordt belast, wordt de bovenkant van het dek ingedrukt en de onderkant een beetje uitgerekt (figuur 1). Om de krachten op te vangen, wordt voorgespannen beton gebruikt: een vorm van gewapend beton waarbij het staal onder grote trekkrachten in het beton is geplaatst (figuur 2). Het voorgespannen staal heeft een grote treksterkte en zal het beton in het brugdek naar




▲ **figuur 1** De stalen wapening is goed bestand tegen trekkrachten.

De vezels hebben als eigenschap dat ze de kunststof sterker maken, doordat ze bestand zijn tegen grote trekkrachten.



▲ **figuur 2** voorgespannen beton aan de onderkant van een brug

zich toe trekken. Deze trekkrachten zorgen voor een druk op het beton en compenseren de trekkrachten aan de onderkant van het brugdek.

## Vezelversterkte kunststof

Veel moderne composieten bestaan uit kunststoffen die zijn versterkt met vezels. Deze vezels kunnen van glas zijn, maar ook van koolstof of aramide (een bepaald type kunststof, beter bekend onder de merknaam kevlar). De vezels hebben als eigenschap dat ze de kunststof sterker maken, doordat ze bestand zijn tegen grote trekkrachten. Ze hebben dus dezelfde functie als het staal in gewapend beton. De kunststof dient als vulmateriaal en is gemaakt van een thermoharder zoals epoxyhars of polyester. Een thermoharder is een polymeer dat bij verhitting niet smelt of van vorm verandert. Het hecht zich aan de vezels en zorgt voor een enorme hardheid. Zo ontstaat een vezelversterkte kunststof die sterker en stijver is dan de kunststof alleen.

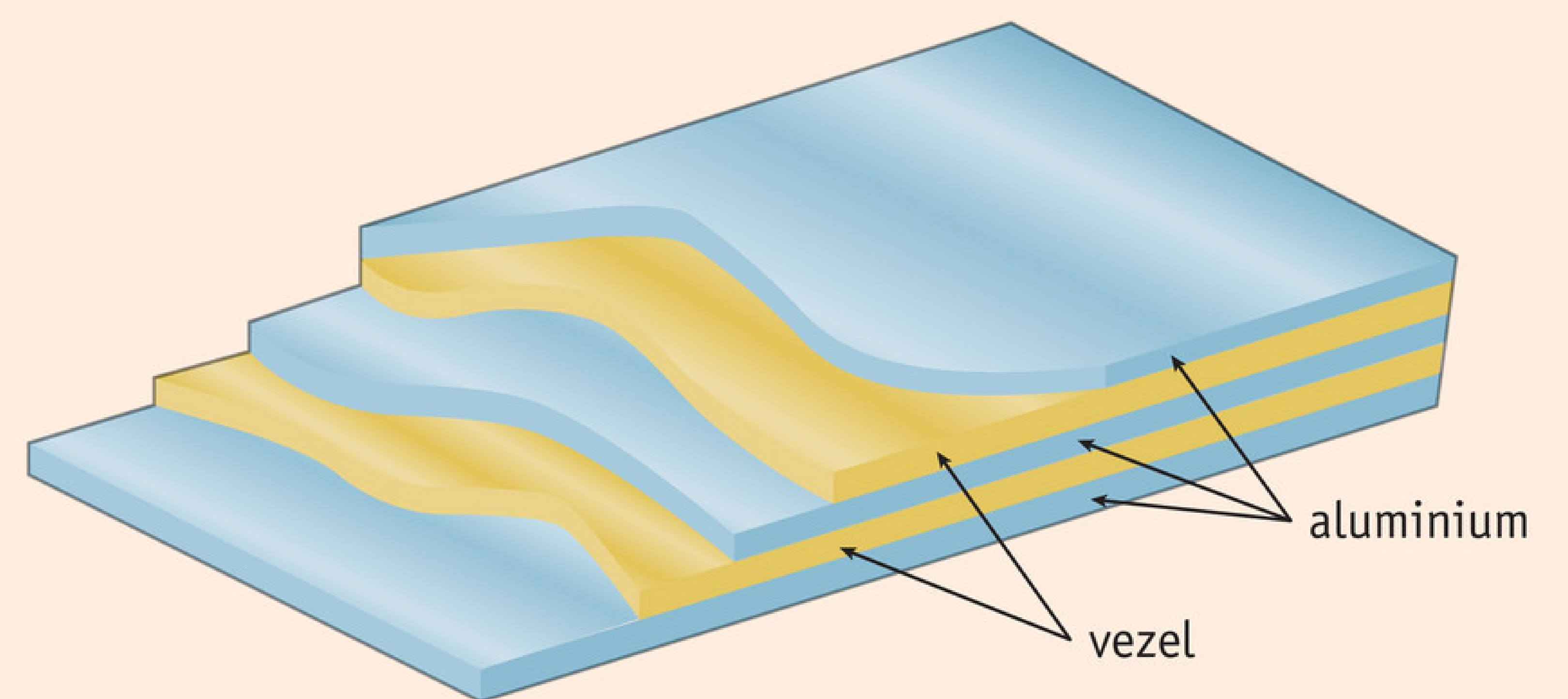
Glasvezels worden getrokken uit gesmolten glas. Ze worden toegepast in situaties waarbij een grote treksterkte belangrijk is, maar het gewicht van minder groot belang is. Koolstofvezels zijn lichter en stijver dan glasvezels. Ze hebben net als glasvezels een grote treksterkte, maar een veel kleinere dichtheid. Daarom worden composieten met koolstof veel toegepast in de wielersport en bij formule 1-wagens, waar elke gram telt.
Aramidevezels zijn zeer stijf en hebben een bijzonder grote treksterkte. Ze zijn bestand tegen forse schokken en grote krachten op een klein oppervlak, een puntbelasting. Daarom worden ze vaak gebruikt in kogelwerende vesten en valhelmen.

## Kleine scheuren, grote gevolgen

Voor de sterkte van een kunststofcomposiet is het belangrijk dat de kunststof goed aan de vezel is gehecht. Bij grote temperatuursveranderingen kunnen vezels losraken van de kunststof. Dit kan kleine scheuren



◀ **figuur 3** Een carbonframe is heel sterk, maar scheurt bij puntbelasting.




▲ **figuur 4** Composieten kunnen ook als laagjes gestapeld zijn.

tot gevolg hebben. Er ontstaan dan zwakke plekken die bij belasting geen rek meer geven.
Een fietsframe gemaakt van carbon (een composiet met koolstofvezels) is heel sterk, maar slecht bestand tegen puntbelasting. Het frame kan bij een kleine botsing of valpartij al scheuren (figuur 3). Het is gevaarlijk om dan verder te rijden, want het frame is veel minder sterk geworden en kan snel breken.

In veel composieten zijn de vezels vermengd met kunststof. Andere composieten bestaan uit laagjes, bijvoorbeeld laagjes metaal en vezelversterkte epoxyhars (figuur 4). Omdat deze composieten zo sterk zijn, worden ze bijvoorbeeld gebruikt om er valhelmen of kogelwerende vesten van te maken. Een nadeel van laagjes is echter dat ze bij schokken of botsen uit elkaar kunnen vallen, waardoor scheurtjes ontstaan. Zo'n valhelm mag na een flinke botsing daarom niet meer worden gebruikt. De helm lijkt misschien nog even sterk als voor de botsing, maar voldoet door de bijna onzichtbare scheurtjes niet meer aan de veiligheidsnormen.

## Glare

In de vliegtuigindustrie wordt veel gewerkt met composieten, onder andere met glare (GLAss REinforced aluminium). Deze composiet is ont-



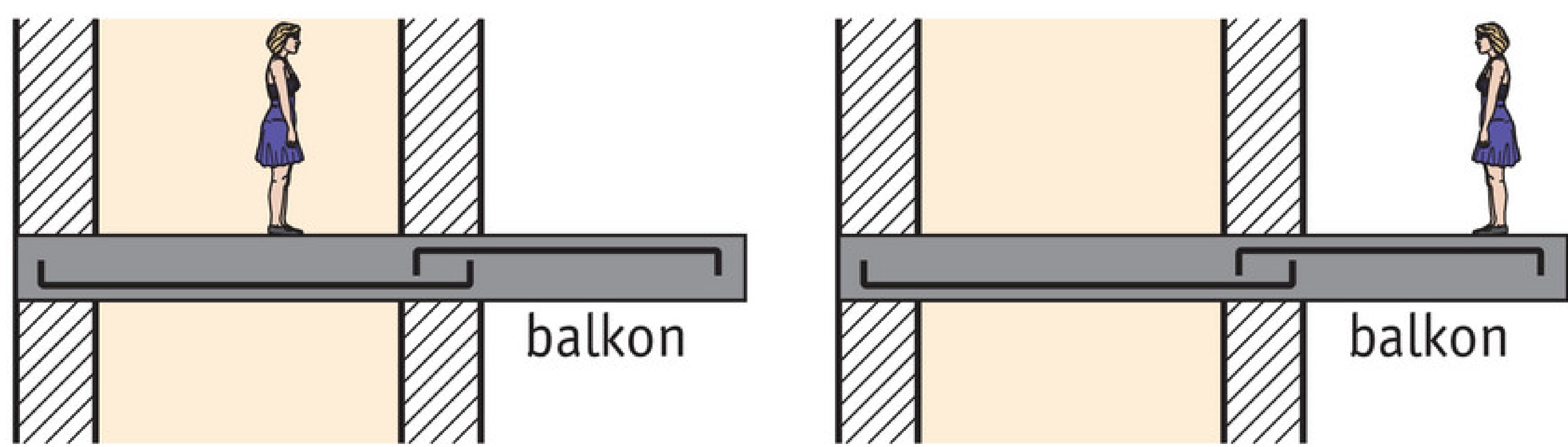

▶ **figuur 5** De Airbus A380 is gedeeltelijk gemaakt van de composiet glare.

wikkeld door de Technische Universiteit Delft en wordt toegepast in de Airbus A330 en A380 (figuur 5). Glare bestaat uit dunne laagjes aluminium met daartussen verlijmde glasvezels. Het heeft een iets lagere dichtheid ($\rho = 2{,}5 \cdot 10^3$ kg m$^{-3}$) dan aluminium, maar de treksterkte is anderhalf keer zo groot als die van staal. De belangrijkste eigenschap van glare is dat het minder snel materiaalmoeheid vertoont dan aluminium. Materiaalmoeheid is de verzwakking van een materiaal als het langdurig wordt belast. Daardoor kunnen scheurtjes in het materiaal ontstaan, wat natuurlijk heel gevaarlijk is in een vliegtuig. De glasvezel in glare zorgt net als de voorgespannen wapening van staal in beton voor een grote treksterkte. Bij het ontstaan van een scheurtje zorgt de glasvezel ervoor dat het aluminium naar elkaar toe wordt getrokken en niet verder breekt.

## Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

**1** Gewapend beton
Voor vloeren wordt vaak gewapend beton gebruikt. Dit is beton met daarin een wapening van stalen staven.
- **a** Welke krachten moet de wapening opvangen?
- **b** Leg uit waarom in een woning de wapening aan de onderkant in de vloer zit en bij het balkon aan de bovenkant (figuur 6).




▲ **figuur 6** de wapening in een vloer en in het balkon

**2** Sport
Honkbalknuppels zijn gemaakt van hout, aluminium of glasfiber.
- **a** Noem drie eigenschappen waaraan het materiaal van een honkbalknuppel moet voldoen.
- **b** Leg het grote voordeel uit van glasfiber ten opzichte van hout.

Glasfiber van een honkbalknuppel heeft een 9× zo grote treksterkte als hout.
- **c** Leg uit hoeveel keer zo dik een houten knuppel moet zijn om een even grote treksterkte te hebben als glasfiber.

Hockeysticks worden verstevigd met aramidevezel. Aramide heeft als eigenschap bijzonder stijf te zijn.
- **d** Leg uit of de elasticiteitsmodulus van aramidevezels klein of groot is.
- **e** Leg uit welk voordeel hockeysticks hebben als ze zijn verstevigd met aramidevezels.

**3** Spinrag
Spinnen maken een web om insecten te vangen. Het spinrag is daarbij elastisch, maar bovendien ook heel sterk. Onderzoek heeft uitgewezen dat spinrag sterker is dan kevlar.
In tabel 1 staan twee stofeigenschappen van spinrag en kevlar.
Stel dat een draad van spinrag (dikte = 0,15 μm) even dik is als een draad van kevlar.

▼ **tabel 1** enkele stofeigenschappen van spinrag en kevlar

| | elasticiteitsmodulus (N m$^{-2}$) | treksterkte (N m$^{-2}$) |
|---|---|---|
| spinrag | $11 \cdot 10^9$ | $4{,}2 \cdot 10^{11}$ |
| kevlar | $109 \cdot 10^9$ | $2{,}8 \cdot 10^9$ |

- **a** Beredeneer welke draad de grootste rek vertoont als hieraan met dezelfde kracht wordt getrokken.
- **b** Bereken voor beide draden de maximale kracht waarmee kan worden getrokken voordat ze breken.

**4** Glare
Glare is een materiaal met bijzondere eigenschappen.
- **a** Waarom is glare opgebouwd uit verschillende laagjes?

Glare is een goede isolator voor bliksem en overleeft enorme verbuigingen.
- **b** Is de soortelijke weerstand van glare dan kleiner of groter dan die van koper?
- **c** Welke materiaaleigenschap zegt iets over de mate waarin een materiaal verbuigt?

# 1 Het molecuulmodel en dichtheid

In deze paragraaf leer je:
- het molecuulmodel gebruiken bij het verklaren van fasen en faseovergangen;
- berekeningen maken met dichtheid.

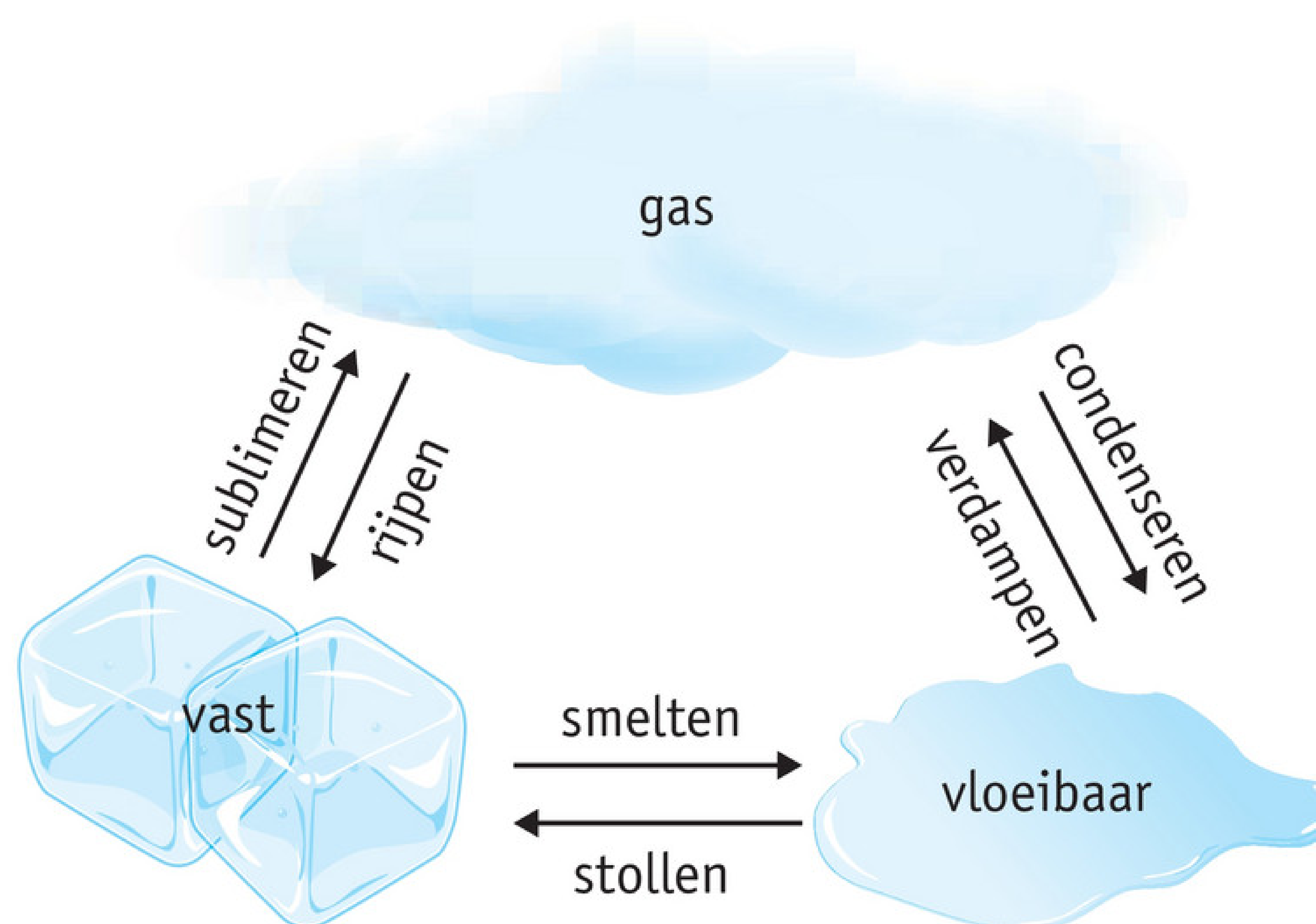
Zand, water en lucht zijn niet alleen verschillende stoffen, ze hebben alle drie ook een verschillende verschijningsvorm bij kamertemperatuur. Achtereenvolgens vast, vloeibaar en gasvormig. Maar als de temperatuur wordt verlaagd naar –10 °C, is water niet meer vloeibaar maar vast: ijs. Een stof heeft dus niet altijd dezelfde verschijningsvorm.

## Fasen

De verschijningsvorm waarin een stof voorkomt, wordt de **fase** genoemd. In welke fase een stof zich bevindt, hangt vooral af van de soort stof en de temperatuur. Veel stoffen kunnen van fase veranderen.
Er zijn zes faseovergangen:
- van vast naar vloeibaar: **smelten**;
- van vloeibaar naar gasvormig: **verdampen**;
- van vast naar gasvormig: **sublimeren** (of vervluchtigen).

En andersom:
- van vloeibaar naar vast: **stollen** (bij water ook: bevriezen);
- van gasvormig naar vloeibaar: **condenseren**;
- van gasvormig naar vast: **rijpen**.

Voor de eerste drie faseovergangen, vast → vloeibaar, vloeibaar → gasvormig en vast → gasvormig, is warmtetoevoer nodig. Bij de omgekeerde faseovergangen komt diezelfde hoeveelheid warmte weer vrij.
De faseovergangen kunnen in een fasediagram worden weergegeven (figuur 1).




▲ **figuur 1** fasediagram met de faseovergangen

## Het molecuulmodel

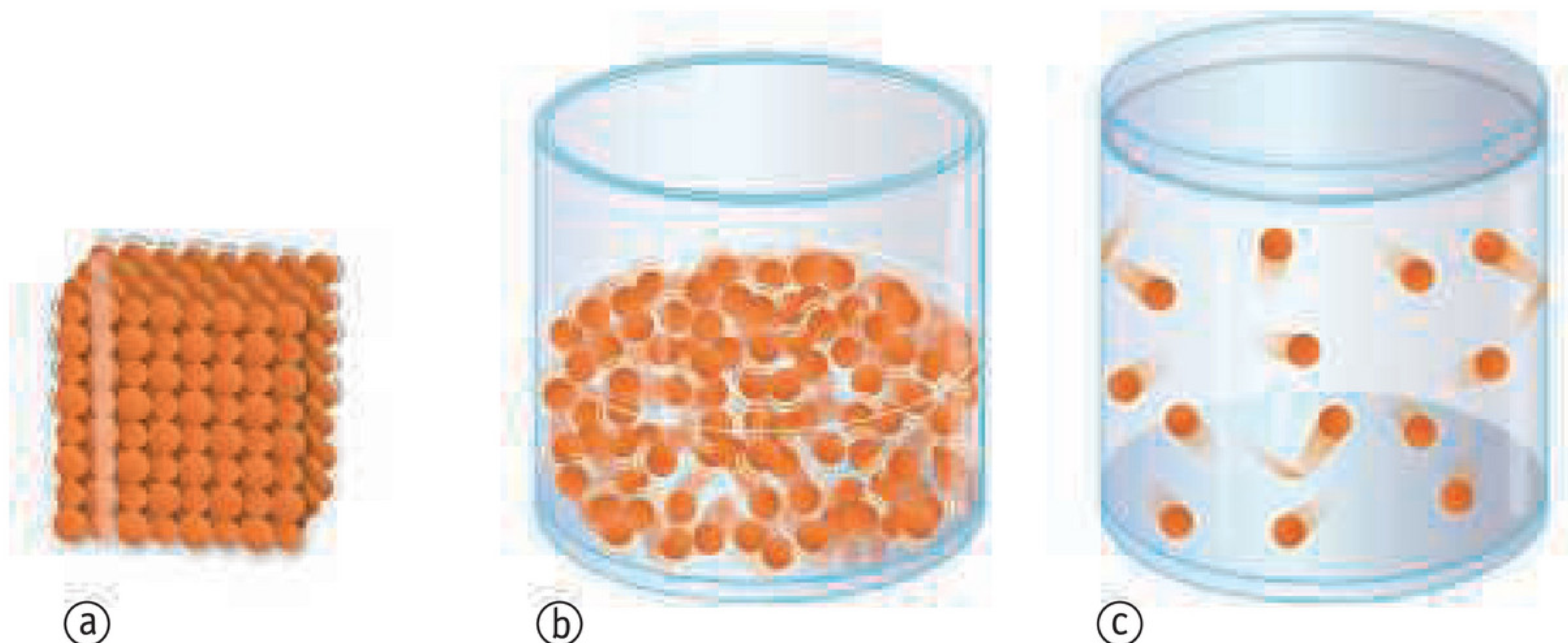
Waarom stoffen de eigenschappen bezitten die je waarneemt, is alleen te verklaren als je weet hoe ze in elkaar zitten. Maar de bouwstenen van stoffen zijn te klein om ze te zien. Daarom wordt in de natuurkunde gebruikgemaakt van een vereenvoudiging van de werkelijkheid: het **molecuulmodel**. In dit model worden de kleinste deeltjes van een stof die nog de eigenschappen van die stof bezitten, moleculen genoemd. De moleculen van een stof zijn allemaal precies

hetzelfde, maar ze verschillen van de moleculen van andere stoffen. Elke stof bestaat dus uit specifieke moleculen. Met dit model kun je niet alleen stofeigenschappen verklaren, je kunt er ook voorspellingen mee doen over wat er bij experimenten met die stoffen zal gebeuren.

De belangrijkste uitgangspunten van het molecuulmodel zijn:
- Tussen de moleculen bevindt zich lege ruimte, de zogenoemde intermoleculaire ruimte.
- De moleculen zijn voortdurend in beweging. De grootte van hun gemiddelde snelheid hangt af van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur, des te groter de gemiddelde snelheid van de moleculen.
- Tussen de moleculen werken geen krachten als de moleculen op grote afstand van elkaar zijn. Bij kleinere afstand tussen de moleculen ontstaat er een onderlinge aantrekkingskracht.

## Fasen en het molecuulmodel

In een vaste stof zijn de moleculen regelmatig gerangschikt in een soort rooster. De afstand tussen de moleculen is klein en de onderlinge aantrekkingskracht is groot. De enige beweging die de moleculen kunnen uitvoeren, is een trilling rondom hun vaste plaats in dat rooster (figuur 2a). Een vaste stof is daarom moeilijk samen te persen of van vorm te veranderen. Natuurkundig gezegd: een vaste stof heeft een constante vorm en volume.




▲ **figuur 2** de fasen vast (a), vloeibaar (b) en gasvormig (c)

Als de temperatuur stijgt, neemt de gemiddelde snelheid van de moleculen toe. Vanaf een bepaalde temperatuur, het **smeltpunt**, is de beweging van de moleculen zo groot geworden dat de onderling aantrekkende krachten niet meer in staat zijn ze in het rooster te houden. De moleculen hebben nu meer ruimte en bewegen kriskras door elkaar heen. De stof is dan vloeibaar (figuur 2b). Het volume is bij een vloeistof constant, maar de vorm niet. Vloeistoffen zijn moeilijk samen te drukken, omdat de moleculen dicht bij elkaar zitten. Een vloeistof neemt de vorm aan van de beker waarin je deze schenkt.

Vanaf een bepaalde temperatuur, het **kookpunt**, gaat de stof over van de vloeibare naar de gasvormige toestand. De snelle moleculen die aan het oppervlak van de vloeistof komen, kunnen uit de vloeistof ontsnappen. Deze moleculen ontsnappen dan aan de aantrekkende krachten tussen de moleculen en zijn dan in de gasvormige fase terechtgekomen. Ze bewegen met grote snelheid en verspreiden zich in de beschikbare ruimte (figuur 2c). De afstand tussen de moleculen is groot, zodat gassen gemakkelijk samen te persen zijn.

## De grootheid dichtheid

Dichtheid is een stofeigenschap. De **dichtheid** van een stof is de massa van één kubieke meter van die stof. Het symbool voor de grootheid dichtheid is de Griekse letter $\rho$, uitgesproken als rho.

In formulevorm ziet het verband tussen massa en volume er als volgt uit:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Hierin is:
- $\rho$ de dichtheid van de stof waarvan het voorwerp is gemaakt in kilogram per kubieke meter ($kg\ m^{-3}$);
- $m$ de massa van het voorwerp in kilogram (kg);
- $V$ het volume van hetzelfde voorwerp in kubieke meter ($m^3$).

Let op: in hoofdstuk 2 heb je gezien dat $\rho$ ook een andere betekenis kan hebben, namelijk de soortelijke weerstand. Je moet dus goed kijken waar een opdracht over gaat, zodat je weet welke $\rho$ wordt bedoeld.

Van veel stoffen is de dichtheid bekend. In Binas tabel 8 tot en met 12 kun je van een aantal veelgebruikte stoffen de dichtheid opzoeken. Let erop dat je bij het aflezen van tabel 8 tot en met 11 met $10^3$ vermenigvuldigt. Deze macht staat boven de kolom.

Zware atomen hebben een grote en zware atoomkern, maar zijn als atoom niet veel groter dan lichte atomen. De dichtheid van een stof hangt daarom voornamelijk af van de massa van de atomen en niet van hun grootte.
De dichtheid van een stof is afhankelijk van de temperatuur. Als de temperatuur toeneemt, wordt de afstand tussen de moleculen groter en daardoor neemt het volume een beetje toe. De massa blijft echter gelijk. Hierdoor verandert de dichtheid. Daarom zijn in Binas de dichtheden bij kamertemperatuur gegeven (293 K).

**Voorbeeldopgave 1**

Een regendruppel heeft een massa van 40 mg. De druppel is bolvormig.
Bereken de straal van de druppel.

*Uitwerking*
De massa van de regendruppel is 40 mg = $40 \cdot 10^{-3}$ g = $40 \cdot 10^{-6}$ kg.
Water heeft volgens Binas tabel 11 een dichtheid van $0{,}9982 \cdot 10^3\ kg\ m^{-3}$.

De formule $\rho = \frac{m}{V}$ moet je omschrijven voordat je de bekende gegevens kunt invullen: $V = \frac{m}{\rho}$

Het volume van de regendruppel is: $V = \frac{m}{\rho} = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{0{,}9982 \cdot 10^3} = 4{,}0 \cdot 10^{-8}\ m^3$

De formule $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$ van de inhoud van een bol kun je in Binas tabel 36B vinden.

Als je deze invult krijg je:

$$4{,}0 \cdot 10^{-8} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$4{,}0 \cdot 10^{-8} = 4{,}2 \cdot r^3$$

$$r^3 = \frac{40 \cdot 10^{-8}}{4{,}2} = 9{,}5 \cdot 10^{-9}$$

$$r = (9{,}5 \cdot 10^{-9})^{1/3} = 2{,}1 \cdot 10^{-3}\ m = 2{,}1\ mm$$

**Onthoud!**

- De fase is de verschijningsvorm van een stof.
- Er zijn drie fasen: vast, vloeibaar en gasvormig.
- Er zijn zes faseovergangen. Voor smelten, verdampen en sublimeren is warmte nodig. Bij stollen, condenseren en rijpen komt warmte vrij.
- Dichtheid is een stofeigenschap die aangeeft hoeveel massa er aanwezig is in een volume van één kubieke meter. Voor de dichtheid van een stof geldt: $\rho = \frac{m}{V}$

**Opdrachten**

**1** Molecuulmodel [1]
Het molecuulmodel helpt je door middel van het gedrag van kleine deeltjes bepaalde voorspellingen te doen.
**a** Beschrijf alle faseovergangen en geef aan hoe ze heten.
**b** Wat is het voordeel van het gebruiken van het molecuulmodel als je faseovergangen wilt verklaren?
**c** Noem de drie uitgangspunten van het molecuulmodel.
**d** Geef de formule voor het berekenen van de dichtheid van een voorwerp.

**2** Faseovergangen
Stoffen kunnen in drie fasen voorkomen.
Met welke faseovergang heb je te maken in de volgende situaties?
**a** Je laat aardappels in een pan voorzichtig droogkoken.
**b** Je laat het vriesvak van de koelkast ontdooien.
**c** Je brillenglazen beslaan bij het binnenstappen van een warme kamer.
**d** Je maakt ijsblokjes in het vriesvak van de koelkast.
**e** Op diepgevroren producten ontstaan ijskristallen.
**f** Een sneeuwlaag wordt bij strenge vorst steeds dunner.

Bekijk nog eens de situaties bij opdracht a tot en met f.
**g** Bij welke faseovergangen is warmtetoevoer vereist?
**h** Bij welke faseovergangen komt warmte vrij?

**3** Molecuulmodel [2]
Met behulp van het molecuulmodel kun je tal van verschijnselen verklaren.
Leg met het molecuulmodel uit dat:
**a** de gekleurde alcohol in de stijgbuis van een thermometer stijgt als de temperatuur stijgt.
**b** na een tijdje een hele kamer naar deodorant ruikt als je hiervan een klein beetje op je lichaam spuit.
**c** een ballon gevuld met lucht uitzet als deze in de zon ligt.
**d** de moleculen van een gas druk uitoefenen op de wanden van de ruimte waarin het gas zich bevindt.

**4** Omrekenen
Neem over en vul in.
**a** 11,35 g $cm^{-3}$ = … kg $m^{-3}$
**b** $7{,}87 \cdot 10^3$ kg $m^{-3}$ = … g $cm^{-3}$
**c** 0,9982 kg $L^{-1}$ = … kg $m^{-3}$
**d** 1,293 kg $m^{-3}$ = … g $L^{-1}$
**e** 0,790 g $cm^{-3}$ = … g $L^{-1}$

**5** Carbonbalk

Kleine balkjes van carbon worden toegepast in de machinebouw. Een balkje van carbon ($\rho = 1{,}760 \cdot 10^3$ kg m$^{-3}$) heeft de volgende afmetingen: $l = 0{,}250$ m, $b = 3{,}50$ cm, $h = 1{,}75$ cm.
Bereken de massa van het balkje.

**6** Zilverdraad

Zilverdraad wordt onder andere toegepast om colloïdaal zilver te maken. Dat wordt bijvoorbeeld gebruikt in oogdruppels. Het heeft een genezende werking.
Een zilverdraad met een dikte van 0,10 mm heeft een massa van 2,0 g.
Bereken de lengte van de zilverdraad.

**7** Jeu de boules

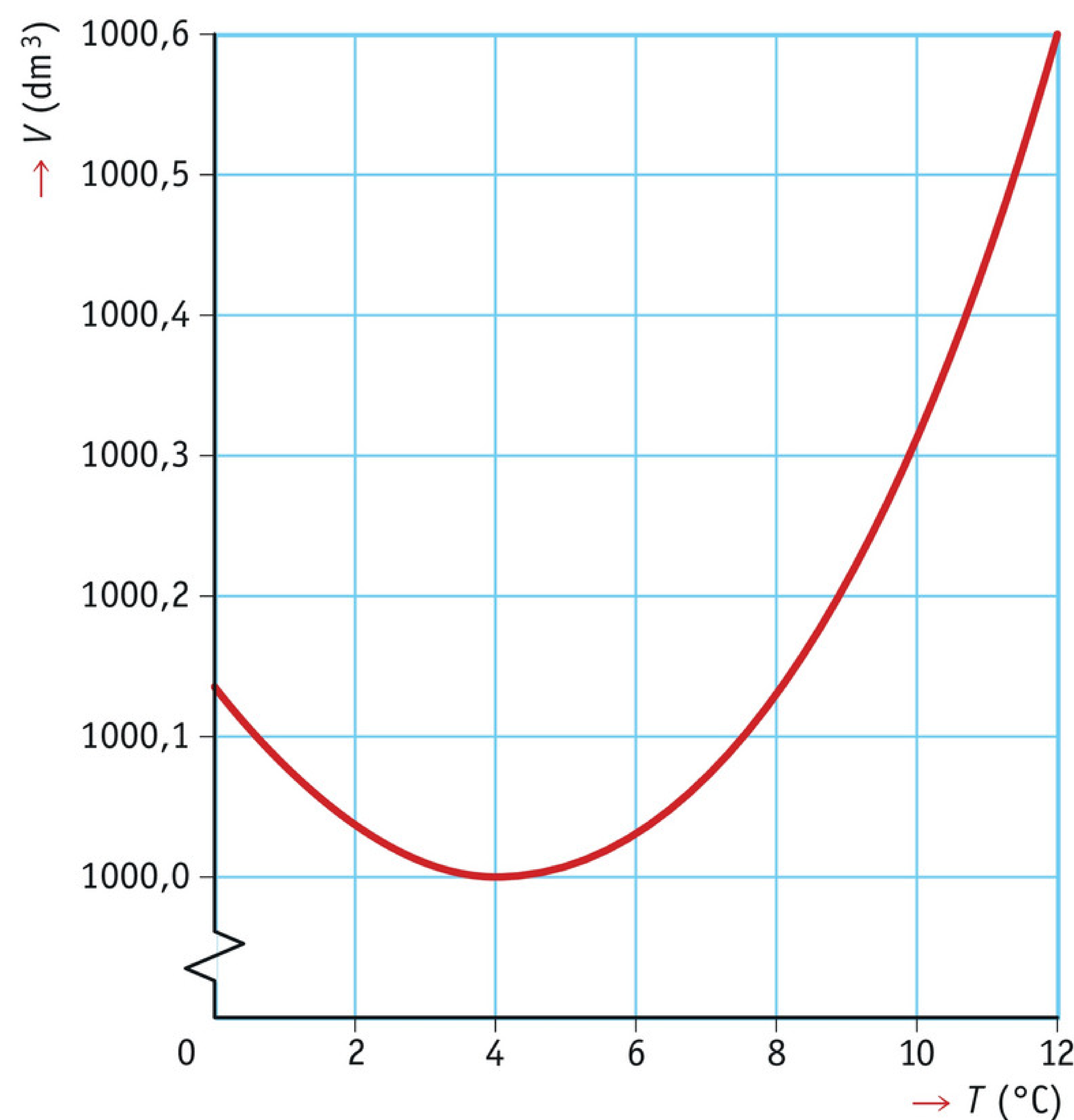
Bij het spelen van het spel jeu de boules worden stalen ballen gebruikt met een straal van 4,0 cm.
Bereken de massa van zo'n bal.

**8** Koper

Koper wordt veel in huis toegepast, bijvoorbeeld als waterleiding.
Teken het $(m,V)$-diagram van koper. Laat het volume variëren van 0 tot 1,0 m$^3$.

**9** Water

Bijna alle vloeistoffen krimpen als de temperatuur daalt, maar water tussen 4 °C en 0 °C is hierop een uitzondering. Tussen deze temperaturen zet water juist uit. In figuur 3 is het $(V,T)$-diagram van 1000 kg water getekend.

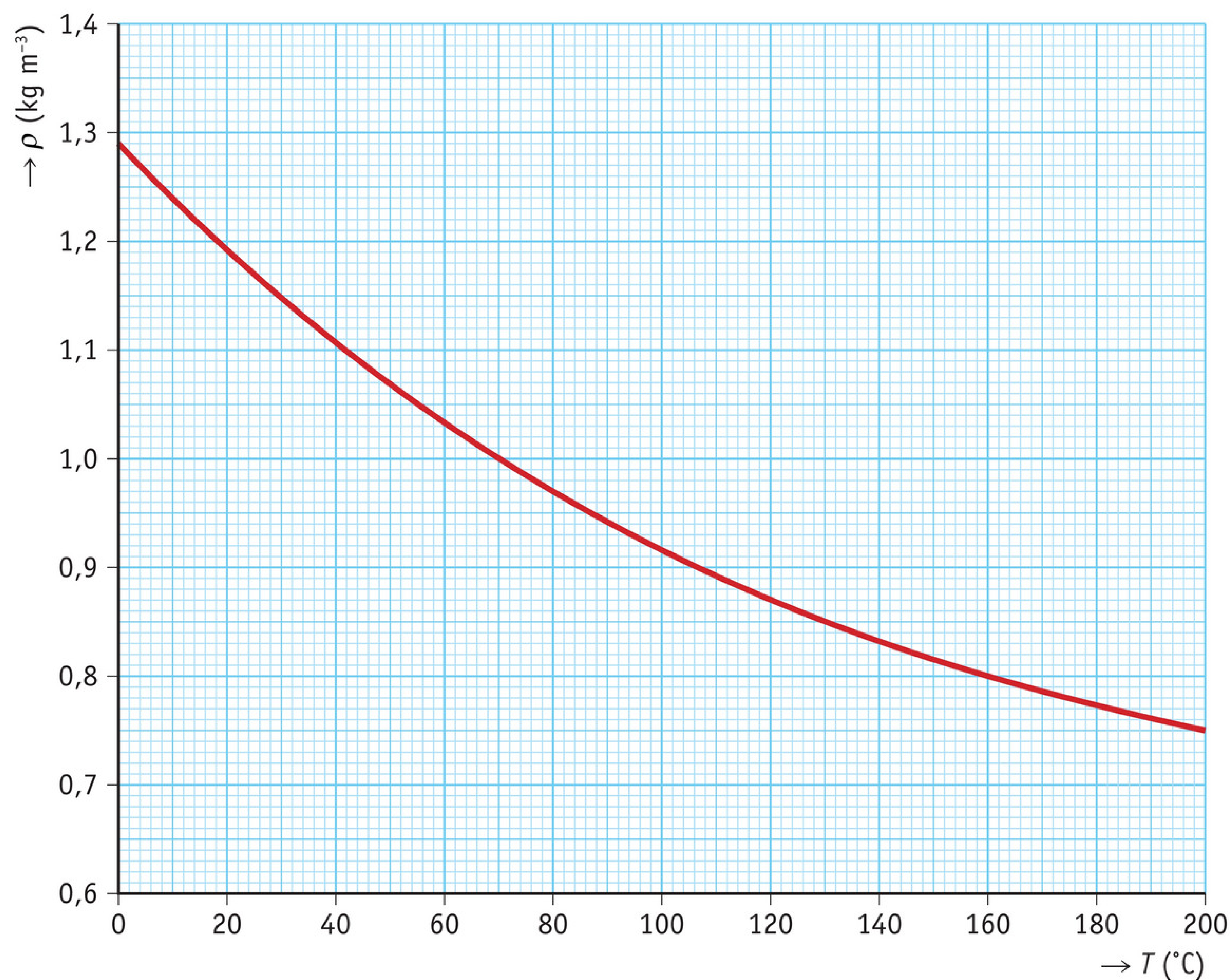



▲ **figuur 3** het $(V,T)$-diagram van 1000 kg water

**a** Leg uit welke vloeistof een grotere dichtheid heeft: water van 0 °C of water van 2 °C.
**b** Als water bevriest, zet het nog verder uit.
Bepaal met hoeveel procent het volume toeneemt als water van 0 °C bevriest in ijs van –4 °C. Gebruik Binas tabel 10.
**c** Als 's winters de waterleiding bevriest, kan deze stukgaan.
Leg uit waardoor dit komt.

**+10** Lucht

In een afgesloten zak zit 200 cm³ lucht van 140 °C. De lucht wordt afgekoeld tot kamertemperatuur. Het ($\rho$,$T$)-diagram van lucht staat in figuur 4.




▲ **figuur 4** het ($\rho$,$T$)-diagram van lucht

**a** Leg met behulp van het molecuulmodel uit wat er met het volume van de lucht gebeurt tijdens het afkoelen.

**b** Bepaal het volume van de zak bij kamertemperatuur ($T$ = 293 K).

# 2 Vervorming

In deze paragraaf leer je:
- spanning-rekdiagrammen te interpreteren;
- berekeningen te doen aan elastische vervormingen;
- het begrip ‘treksterkte’ toe te passen.

Als twee teams een wedstrijd touwtrekken houden, krijgt het touw flink wat trekkrachten te verduren. Het touw wordt tijdens het trekken een beetje langer. Het kan zelfs breken als de krachten te groot worden. Of het touw breekt, is niet alleen afhankelijk van de grootte van de uitgeoefende krachten, maar ook van het materiaal waarvan het touw is gemaakt en van de doorsnede van het touw.

## Elastische en plastische vervorming

Je weet dat een kracht een voorwerp kan vervormen. Deze vervorming kan tijdelijk of blijvend zijn. Tijdelijke vervorming wordt **elastische vervorming** genoemd. De vervorming verdwijnt weer als er geen kracht meer op het voorwerp wordt uitgeoefend. Elastische vervorming treedt op wanneer je een gewichtje aan een veer hangt. De veer wordt dan langer (en vervormt dus), doordat de afstand tussen de moleculen iets groter wordt. Als je het gewichtje weer weghaalt, krijgt de veer zijn oorspronkelijke lengte weer terug. Maar als je te veel gewichtjes aan de veer hangt, blijft de veer gedeeltelijk uitgerekt als je de gewichtjes weer weghaalt. Er is dan sprake van **plastische vervorming**.

## Veerconstante

De Engelse natuurkundige Robert Hooke (1635–1703) heeft het verband onderzocht tussen de elastische vervorming en de vervormende kracht. Hij ontdekte dat de grootte van de vervorming recht evenredig is met de vervormende kracht. Dit is de **wet van Hooke**. Bij een 2× zo grote kracht wordt de vervorming dus ook 2× zo groot.

Er is een voorbeeld van de wet van Hooke dat je al kent: de veer. Bij een veer is de **uitrekking *u*** recht evenredig met de vervormende kracht $F$. De evenredigheidsconstante kun je berekenen met de volgende formule:

$$C = \frac{F}{u}$$

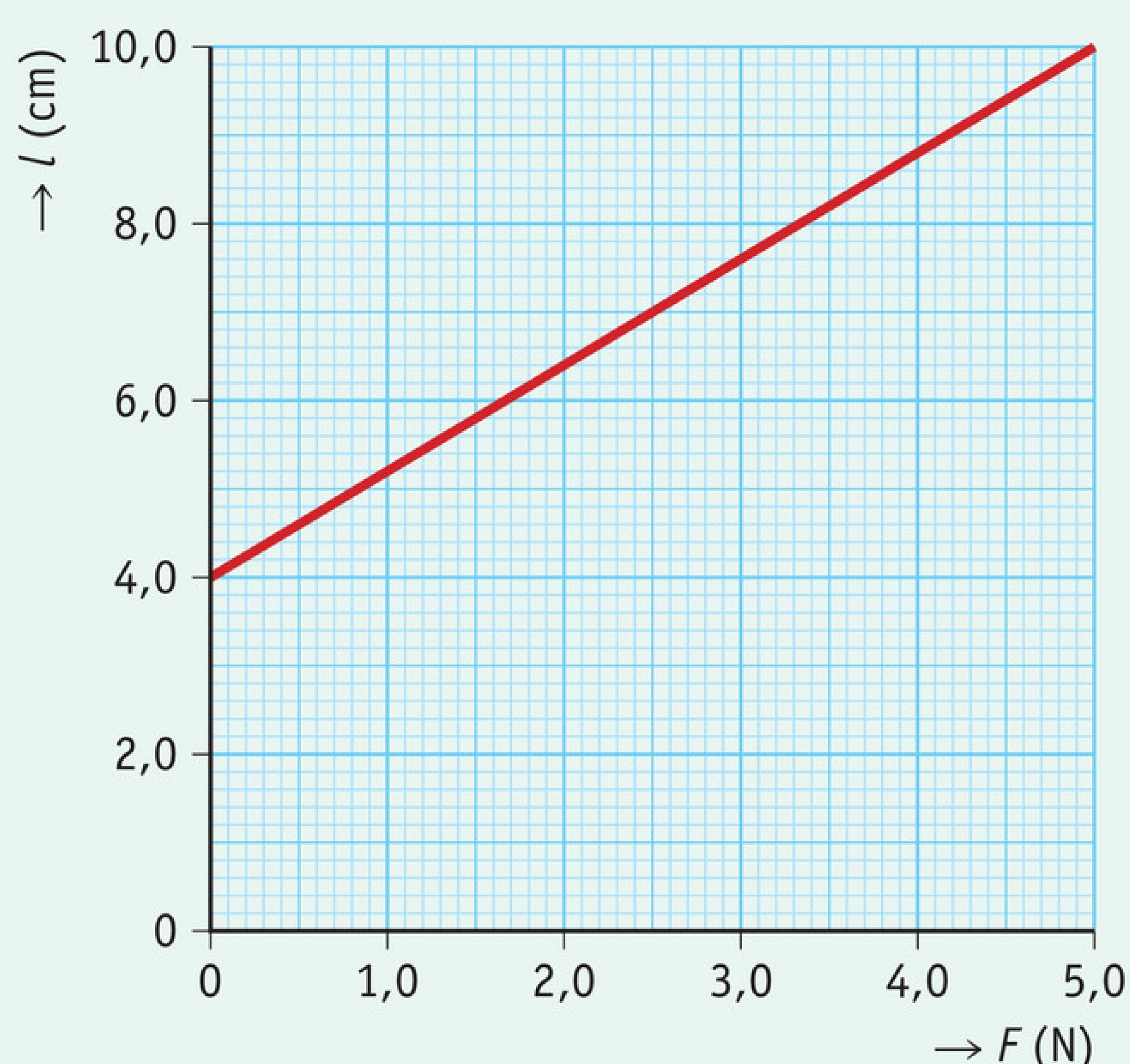
Hierin is:

- $C$ de veerconstante in newton per meter of newton per centimeter (N $m^{-1}$ of N $cm^{-1}$);
- $F$ de kracht die de vervorming veroorzaakt in newton (N);
- $u$ de uitrekking van de veer in centimeter of meter (cm of m).

De veerconstante uitgedrukt in N $m^{-1}$ is niets anders dan de kracht die nodig is om de veer één meter uit te rekken. Daarom is het getal bij N $cm^{-1}$ ook kleiner dan bij N $m^{-1}$: je moet meer kracht uitoefenen om de veer één meter uit te rekken dan om dezelfde veer één centimeter uit te rekken.
De veerconstante is ook de steilheid van de rechte lijn in een ($F$,$u$)-grafiek.

**Voorbeeldopgave 2**

In figuur 5 is een ($l$,$F$)-diagram van een veer getekend. Als de veer onbelast is, heeft deze een lengte $l$ van 4,0 cm.




▲ **figuur 5** het ($l$,$F$)-diagram van een veer

Bepaal de veerconstante van de veer in N $cm^{-1}$ en N $m^{-1}$.

*Uitwerking*
Formule: $C = \frac{F}{u}$
Gegevens:
Als de veer belast wordt met 5,0 N is de lengte 10,0 cm.
De uitrekking $u$ is dan 10,0 – 4,0 = 6,0 cm.

De veerconstante is dan: $C = \frac{F}{u} = \frac{5,0\ \text{N}}{6,0\ \text{cm}} = 0,83\ \text{N cm}^{-1} = 83\ \text{N m}^{-1}$

De veer rekt dus 1,0 cm uit als deze wordt belast met 0,83 N. Om de veer 1,0 m uit te rekken, moet de kracht 100× zo groot worden, namelijk 83 N.

## Rek

Als je aan een draad trekt, rekt deze uit en wordt elastisch vervormd. Als je bijvoorbeeld aan een draad van 10 m lengte trekt, kan deze draad 3,0 cm uitrekken. Trek je met even grote kracht aan eenzelfde soort draad van 30 m lengte, dan rekt deze draad 9,0 cm uit. De 3× langere draad rekt dus 3× zo veel uit. Je kunt de lange draad opgebouwd denken uit drie draden van 10 m achter elkaar die elk 3,0 cm uitrekken. In verhouding rekken de draden van 10 m en van 30 m lengte dus evenveel uit.
Om de uitrekking van draden van verschillende lengte goed met elkaar te kunnen vergelijken, bereken je de uitrekking van één meter draad. Dit wordt de **relatieve rek** of kortweg **rek $\varepsilon$** genoemd. Je berekent de rek door de uitrekking van de draad te delen door de lengte van de draad:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Hierin is:
- $\varepsilon$ de relatieve rek (zonder eenheid);
- $\Delta l$ de uitrekking in meter (m);
- $l_0$ de oorspronkelijke lengte in meter (m).

Als je de rek van de twee hiervoor genoemde draden uitrekent, zie je dat ze dezelfde rek hebben:
draad 1: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0,03}{10} = 0,003$

draad 2: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0,09}{30} = 0,003$

Je ziet dat de rek dus onafhankelijk is van de lengte als de draden van hetzelfde materiaal zijn gemaakt. Je kunt de rek van een draad berekenen, maar ook die van een touw of staaf. Soms wordt de rek uitgedrukt in procenten. Dan moet je de uitkomst van $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ nog vermenigvuldigen met 100%. De twee draden uit het voorbeeld hebben dan een rek van 0,003 × 100% = 0,3%.

## Spanning

Als je aan een draad trekt, ontstaat er een **spanning** in de draad. In een draad of homogene staaf reken je de spanning uit met de formule:

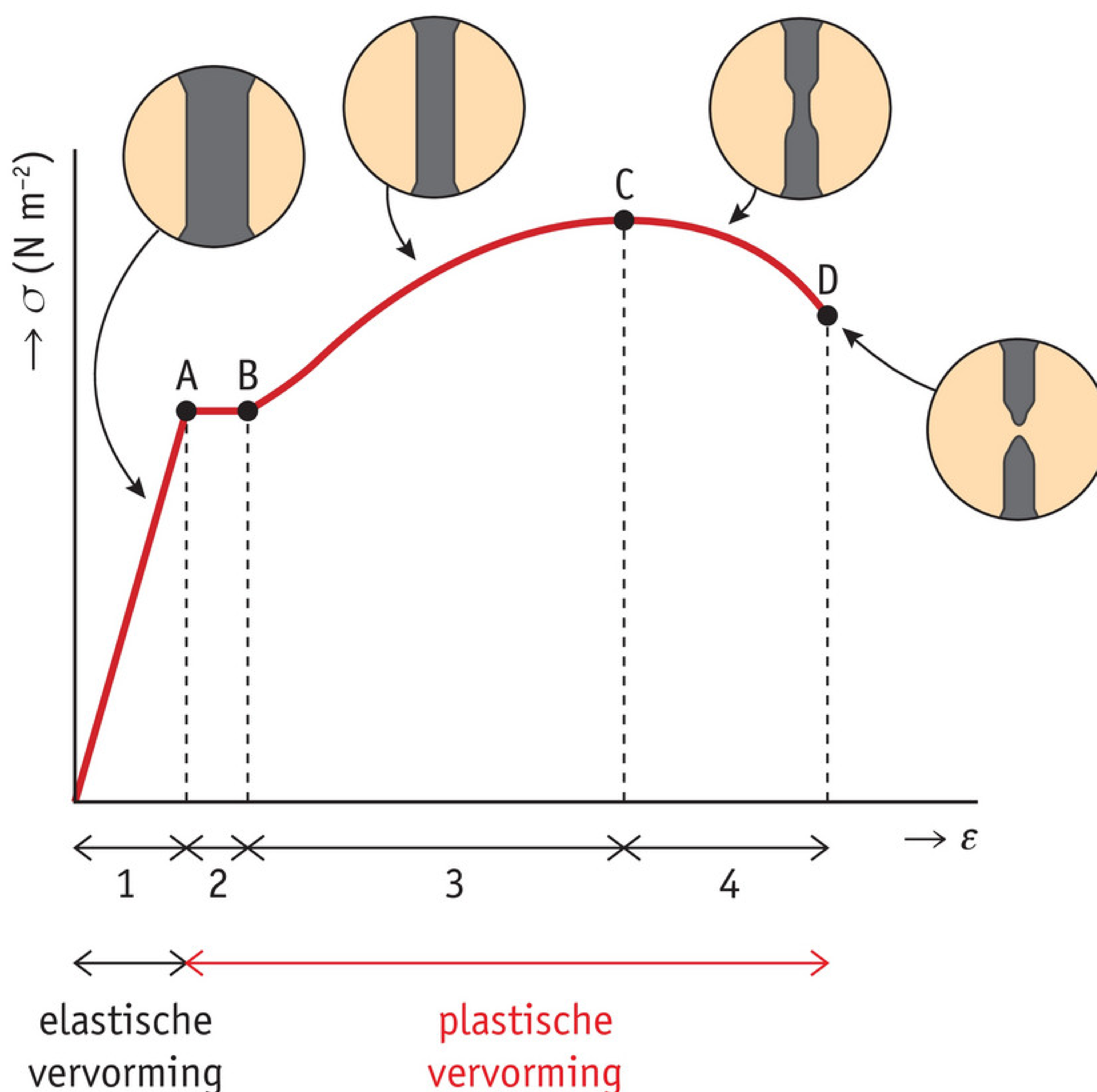
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Hierin is:
- $\sigma$ de spanning in newton per vierkante meter of pascal (N m$^{-2}$ of Pa);
- $F$ de kracht in newton (N);
- $A$ de oppervlakte waaraan de kracht trekt in vierkante meter (m$^2$).

Het symbool voor de grootheid spanning $\sigma$ wordt uitgesproken als sigma. Verwar spanning niet met spankracht of elektrische spanning. De eenheid van $\sigma$ is N m$^{-2}$, maar kan ook worden geschreven als Pa (pascal). Er geldt namelijk dat 1 N m$^{-2}$ hetzelfde is als 1 Pa.

## Spanning-rekdiagram

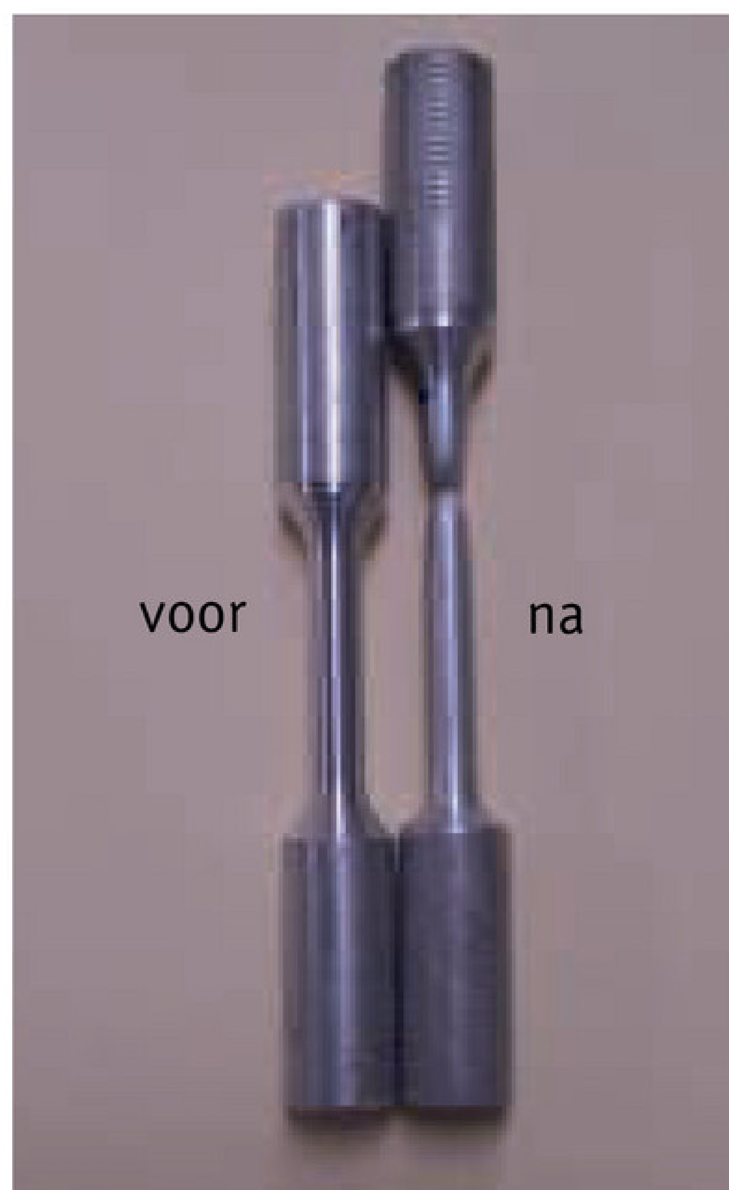
Als je trekkrachten van verschillende grootten op een draad uitoefent en de uitrekkingen van deze draad meet, kun je de rek van de draad en de uitgeoefende spanning uitrekenen. Het is gebruikelijk deze in een zogenoemd **spanning-rekdiagram** ofwel (spanning,rek)-diagram te tekenen. Zo'n diagram, dat vrijwel altijd dezelfde vorm heeft, is afgebeeld in figuur 6.




▲ **figuur 6** een (spanning,rek)-diagram

In dit diagram kun je vier gebieden onderscheiden:
- Gebied 1: bij een kleine rek is de vervorming van de draad elastisch. In dit gebied geldt de wet van Hooke. De rek is hier tot punt A recht evenredig met de spanning.
- Gebied 2: hier krijgt de draad bij een klein beetje meer spanning een veel grotere rek. Dit betekent dat de draad met weinig extra kracht veel langer wordt en plastisch vervormt. Het lijkt erop dat de draad, net als een vloeistof, geen eigen vorm meer heeft. Daarom wordt het gebied na punt A het vloeigebied genoemd.
- Gebied 3: als de draad is gestopt met vloeien, kan deze worden belast tot een maximale spanning $\sigma_{max}$ die de **treksterkte** heet. De treksterkte is weergegeven met punt C.
- Gebied 4: uiteindelijk wordt de draad op één plaats heel dun, wat insnoering wordt genoemd. Op deze plaats zal de draad breken (punt D).

In figuur 7 zie je een metalen staafje dat is gefotografeerd voor en na het uitvoeren van een trekproef. Je kunt duidelijk zien dat het staafje tijdens de trekproef is uitgerekt en plastisch is vervormd. Bij de plaats van de breuk is het staafje ingesnoerd.




◀ **figuur 7** een staafje voor en na een trekproef

Er zijn materialen die nagenoeg geen rek vertonen, maar direct breken als er trekkrachten op worden uitgeoefend. Deze materialen zijn bros. IJzer is een voorbeeld van een elastisch materiaal. Composiet dat de tandarts gebruikt bij het vullen van gaatjes, is plastisch. Beton is bros.

## Elasticiteitsmodulus

In gebied A van het spanning-rekdiagram in figuur 6, het lineaire gebied, is de rek recht evenredig met de spanning. In dit elastische gebied geldt dat $\frac{\sigma}{\varepsilon}$ = constant. Deze constante wordt de **elasticiteitsmodulus *E*** genoemd. Je berekent de elasticiteitsmodulus met de formule:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Hierin is:
- $E$ de elasticiteitsmodulus in newton per vierkante meter of pascal (N $m^{-2}$ of Pa);
- $\sigma$ de spanning in newton per vierkante meter of pascal (N $m^{-2}$ of Pa);
- $\varepsilon$ de rek (zonder eenheid).

De elasticiteitsmodulus is de spanning die nodig is om een draad 100% rek te geven. Een stof met een grote elasticiteitsmodulus is moeilijk uit te rekken. De stof is stijf en star. Staal is zo'n voorbeeld ($E = 0{,}20 \cdot 10^{12}$ N $m^{-2}$). Zo'n stof vertoont weinig rek als er spanning op wordt uitgeoefend. In Binas tabel 8, 9 en 10 vind je de elasticiteitsmodulus van verschillende stoffen. Vergeet de factor niet die boven de kolom staat, waarmee je alle waarden moet vermenigvuldigen.

**Voorbeeldopgave 3**

Een rubberen draad ($E = 5{,}0 \cdot 10^{5}$ N $m^{-2}$) wordt 2,0× zo lang als er een kracht op wordt uitgeoefend.
Bereken de spanning in de draad.

*Uitwerking*
Gegevens:
$E = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ N $m^{-2}$

Formules: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon$ en $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Als de draad 2× zo lang wordt, is de lengteverandering $\Delta l$ van de draad even groot als de oorspronkelijke lengte $l_0$. Dit betekent dat $\Delta l = l_0$ en $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = 1{,}0$.
$\sigma = E \cdot \varepsilon = 5{,}0 \cdot 10^5 \times 1{,}0 = 5{,}0 \cdot 10^5\ \text{N m}^{-2}$

**Voorbeeldopgave 4**

Een 12,0 m lange stalen draad heeft een dikte van 4,00 mm en hangt verticaal. Aan de draad wordt een massa van 60,0 kg gehangen. De elasticiteitsmodulus van staal is 200 MPa.

**a** Bereken de spanning in de draad.
**b** Bereken de relatieve rek van de draad.
**c** Bereken de nieuwe lengte van de draad.

*Uitwerking*

**a** De dikte van de draad is gelijk aan de diameter = 4,00 mm.

De straal van de draad is dus $\frac{4,00}{2} = 2{,}00\ \text{mm} = 2{,}00 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$

De oppervlakte waaraan de kracht trekt, is: $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (2{,}00 \cdot 10^{-3})^2 = 1{,}26 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2$
De kracht waarmee aan de draad wordt getrokken, is gelijk aan het gewicht van de massa

$F = F_z = m \cdot g = 60{,}0 \times 9{,}81 = 598\ \text{N}$

Nu kun je de spanning berekenen: $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{589}{1{,}26 \cdot 10^{-5}} = 467 \cdot 10^5\ \text{N m}^{-2}\ (= 467 \cdot 10^5\ \text{Pa})$.

**b** Om de relatieve rek te berekenen, moet je de formule voor de elasticiteitsmodulus omwerken:

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

$E = 200\ \text{MPa} = 200 \cdot 10^6\ \text{N m}^{-2}$
$\sigma = 467 \cdot 10^5\ \text{N m}^{-2}$ (uitkomst van opgave a)

Invullen geeft: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{467 \cdot 10^5}{200 \cdot 10^6} = 0{,}234$

**c** Om het verschil in lengte te berekenen, moet je de formule voor de rek omwerken:

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = \varepsilon \cdot l_0$

Gegevens:
$l_0 = 12{,}0\ \text{m}$
$\varepsilon = 0{,}234$ (uitkomst van opgave b)
Invullen geeft: $\Delta l = \varepsilon \cdot l_0 = 0{,}234 \times 12{,}0 = 2{,}81\ \text{m}$
De nieuwe lengte van de draad is 12,0 + 2,81 = 14,8 m.

▶ **EXPERIMENT 1** Vervorming van een zaagblad

## Onthoud!

- Bij de wet van Hooke is de uitrekking van een veer of draad recht evenredig met de uitgeoefende kracht. Hierbij geldt: $C = \frac{F}{u}$
- De rek is de uitrekking van een draad gedeeld door de lengte van een draad. Je kunt de rek berekenen met de formule $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$
- De spanning is de trekkracht die wordt uitgeoefend op een oppervlakte van één vierkante meter. Je kunt de spanning berekenen met de formule $\sigma = \frac{F}{A}$
- De maximale spanning die een draad kan ondergaan, wordt de treksterkte genoemd.
- De elasticiteitsmodulus is de spanning die nodig is om een draad 100% rek te geven. De elasticiteitsmodulus bereken je met de formule $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

## Opdrachten

**11** Formules
Maak de volgende opdrachten.
**a** Geef de formule met bijbehorende eenheden voor het berekenen van de veerconstante.
**b** Geef de formule met bijbehorende eenheden voor het berekenen van de spanning ten gevolge van een trekkracht.
**c** Geef de formule met bijbehorende eenheden voor het berekenen van de rek van een draad.
**d** Wat wordt verstaan onder de elasticiteitsmodulus?
**e** Geef de formule met bijbehorende eenheden voor het berekenen van de elasticiteits-modulus.
**f** In het spanning-rekdiagram van een draad zijn vier verschillende gebieden te herken-nen.
Geef van elk van deze vier gebieden een korte omschrijving.

**12** Omrekenen
Neem over en vul in.
**a** $C$ = 20 N $cm^{-1}$ = … N $m^{-1}$
**b** $C$ = 5,0 kN $m^{-1}$ = … N $cm^{-1}$
**c** $\sigma$ = $670 \cdot 10^5$ N $m^{-2}$ = … N $cm^{-2}$
**d** $\sigma$ = $2{,}28 \cdot 10^2$ N $cm^{-2}$ = … N $m^{-2}$
**e** $\sigma$ = 0,40 GPa = … N $m^{-2}$

**13** Veerconstante van een plank
Je kunt zeggen dat een plank over een sloot een veerconstante heeft.
**a** Leg in woorden uit wat je met deze veerconstante bedoelt.
**b** Als er een massa van 150 kg op de plank wordt gelegd, buigt de plank 9,0 cm door. Bereken de veerconstante van deze plank.
**c** Teken het ($u$,$F$)-diagram van deze plank voor een kracht van 0 N tot $2{,}0 \cdot 10^3$ N.
**d** Wat gebeurt er met de plank als deze plastisch doorbuigt?

**14** Rek

Je kunt de rek van een draad uitrekenen met een formule.

**a** Toon aan dat rek geen eenheid heeft.

**b** Leg uit wat het betekent als de trekkracht op een touw ervoor zorgt dat dit touw een rek $\varepsilon = 2$ krijgt.

**15** Draad [1]

Op een 2,0 m lange draad met een dikte van 6,0 mm wordt een trekkracht uitgeoefend van 100 N. De draad rekt daardoor 2,0 cm uit.

**a** Bereken de spanning in de draad.

**b** Bereken de rek.

**c** Bereken de rek in procenten.

**d** Bereken de elasticiteitsmodulus.

**e** Leg het verschil uit tussen de grootheden *uitrekking* en *rek*.

**16** Kunstwerk

Rick wil een kunstwerk van 18 kg ophangen aan een 5,0 mm dikke draad van 80 cm lengte. De draad breekt bij een spanning van $7{,}0 \cdot 10^6$ N m$^{-2}$.

Bereken of de draad sterk genoeg is.

**17** Koperdraad

Koperdraden worden toegepast als rijdraad in de bovenleiding van een trein.

Bereken hoeveel kilogram je aan een koperdraad van 200 m lengte en met een doorsnede van 100 mm$^2$ moet hangen om deze draad 15 cm te laten uitrekken.

**18** Draad [2]

Aan een draad met lengte $l$ en dikte $d$ hangt een massa $m$.

Leg uit of, en in welke mate, de spanning en de rek veranderen als:

**a** je massa $m$ door een 2× zo grote massa vervangt.

**b** de draad 2× zo lang is.

**c** de draad 2× zo dik is.

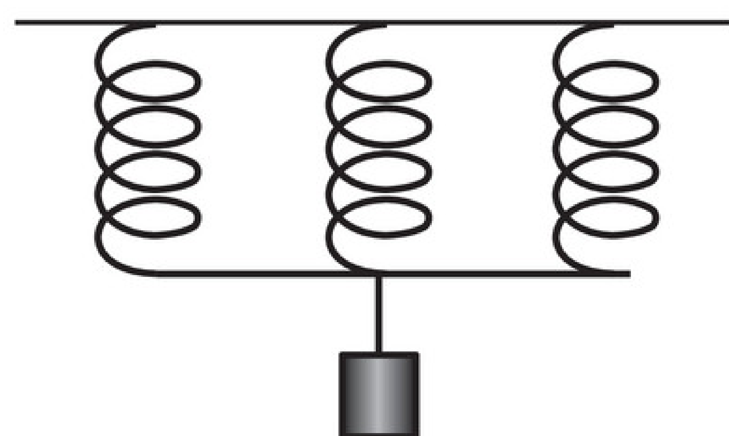
**d** de draad 2× zo lang en 2× zo dik is.

**+19** Veerconstante van een veer

Een veer heeft een veerconstante van 2,0 N cm$^{-1}$. Han knipt deze veer in drie precies even grote stukken.

**a** Hoe groot is de veerconstante van één stuk?

De drie stukken worden naast elkaar gehangen en aan de onderkant aan elkaar vastgemaakt. Vervolgens wordt er een gewichtje van 500 g aan gehangen (figuur 8).



▲ **figuur 8** drie stukken veer

**b** Hoeveel rekt elk stuk veer nu uit?

**c** Bereken de totale veerconstante van dit stelsel van drie veren.

**+20** Dyneema

Voor het omhooghijsen van gezonken schepen in diep water worden vaak kabels van de polyetheenvezel dyneema gebruikt in plaats van staal. Een reden hiervoor is dat staal onder zijn eigen gewicht kan breken.

De dichtheid van staal is $7{,}8 \cdot 10^3$ kg m$^{-3}$ en de treksterkte is $4{,}0 \cdot 10^8$ N m$^{-2}$.

Een stalen kabel hangt (denkbeeldig) vrij naar beneden in de lucht.

**a** Bereken de maximale lengte van de kabel als deze onder zijn eigen gewicht breekt.

Dyneema heeft een treksterkte van $3{,}5 \cdot 10^9$ N m$^{-2}$ en breekt pas onder zijn eigen gewicht als deze 400 km lang is.

**b** Bereken de dichtheid van dyneema.

**c** Leg uit waarom een kabel van dyneema verzwaard moet worden in het water.

---

# 3 Warmte en temperatuur

In deze paragraaf leer je:
- omrekenen van graden Celsius naar kelvin en omgekeerd;
- soortelijke warmte als stofeigenschap toe te passen;
- het verband beschrijven tussen de dichtheid van metalen en de soortelijke warmte.

Vaak worden de begrippen ‘warmte’ en ‘temperatuur’ door elkaar gebruikt. Het zijn echter twee verschillende grootheden.

## De grootheden warmte en temperatuur

De volgende voorbeelden laten zien dat warmte en temperatuur niet hetzelfde zijn.
- Als je een bekerglas water met een brander verhit, stijgt de temperatuur tot 100 °C. Als je het bekerglas water met de brander blijft verhitten, voer je steeds meer warmte toe aan het water. Maar de temperatuur van het water verandert niet meer. De temperatuur blijft 100 °C tot al het water is verdampt.
- Leg een groot en een klein blokje aluminium in een oven die ingesteld is op 200 °C. Na een tijdje is de temperatuur van beide blokjes 200 °C. Haal ze dan met een tang uit de oven en doe ze elk in een bekerglas met evenveel koud water van dezelfde temperatuur. Ondanks het feit dat de blokjes allebei dezelfde temperatuur hebben, geeft het grote blokje meer warmte af en laat het water in het bekerglas meer in temperatuur stijgen dan het kleine blokje.

## Verschil tussen warmte en temperatuur

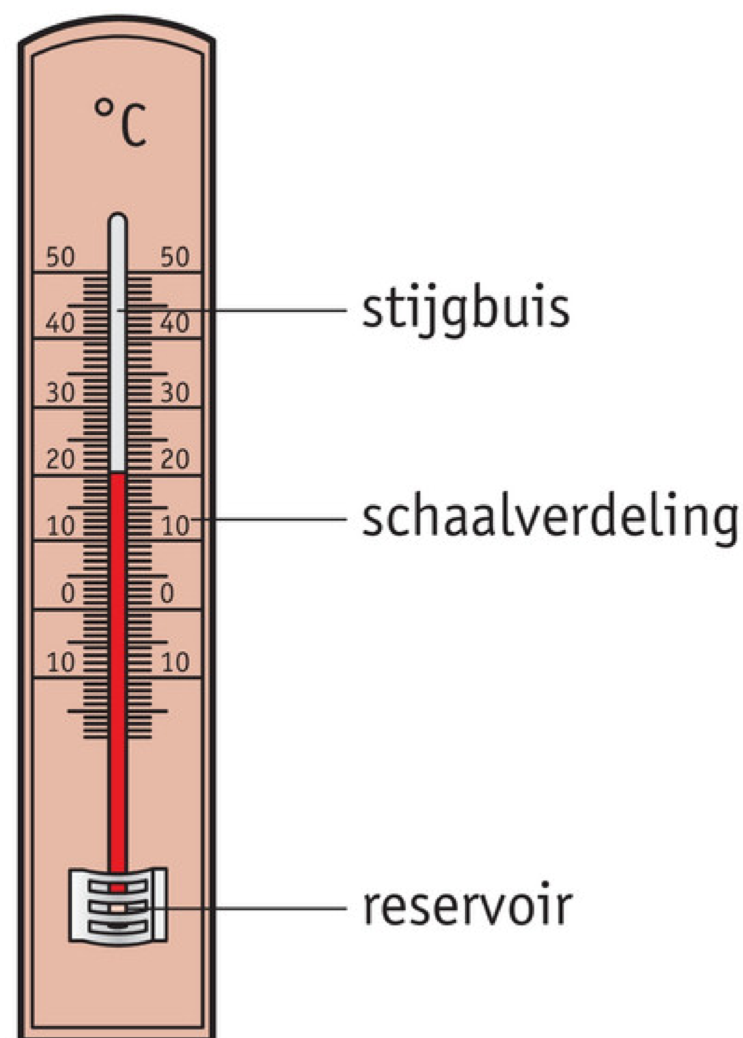
Warmte is een vorm van energie. Eigenlijk is warmte energie die zich verplaatst van de ene plek naar de andere plek. De grootheid warmte wordt weergegeven met het symbool $Q$. De eenheid van warmte is de joule (J), omdat dit de eenheid van energie is. De temperatuur is een maat voor de snelheid van de moleculen. Hoe hoger de temperatuur, des te groter de gemiddelde snelheid van de moleculen.

Als je warmte toevoert aan een voorwerp, leidt dit meestal tot een temperatuurstijging van dat voorwerp. De warmte wordt dan gebruikt om de snelheid en dus de bewegingsenergie van de moleculen te vergroten. Een voorwerp dat wordt verhit, zet ook uit. Een deel van de warmte wordt namelijk gebruikt om de afstand tussen de moleculen te vergroten.

Let op: het symbool $Q$ wordt zowel voor de grootheid warmte als voor de grootheid lading gebruikt. Het ligt aan de situatie of $Q$ warmte of lading voorstelt.

## Temperatuur

De temperatuur wordt dikwijls gemeten met een vloeistofthermometer. In figuur 9 kun je zien dat zo'n thermometer uit een reservoir met een stijgbuis bestaat. Hierin bevindt zich een vloeistof. Als de temperatuur stijgt, zet de vloeistof uit. Het glas zet ook uit, maar veel minder dan de vloeistof. Daardoor stijgt de vloeistof in de stijgbuis. De hoogte van de vloeistof in de stijgbuis geeft de temperatuur aan. Deze is af te lezen op een schaalverdeling. De stijgbuis wordt ook wel **capillair** genoemd. De vloeistof in een thermometer is meestal alcohol waaraan een kleurstof is toegevoegd.




▲ **figuur 9** thermometer

## Temperatuurschalen

De Zweedse astronoom Anders Celsius (1701–1744) maakte een schaalverdeling waarbij hij de temperatuur van smeltend ijs op 0 °C stelde en de temperatuur van kokend water op 100 °C.
De Duitse natuurkundige Gabriel Fahrenheit (1686–1736) maakte een schaalverdeling waarbij hij de temperatuur van een mengsel van water, ijs en zout op 0 °F stelde en de temperatuur van een gezond menselijk lichaam op 96 °F. De Brit William Thomson (1824–1907; in de adelstand verheven tot Lord Kelvin) bedacht weer een andere temperatuurschaal, de **absolute temperatuur**. Hij maakte bij zijn schaal gebruik van het feit dat moleculen sneller gaan bewegen als de temperatuur toeneemt en langzamer als de temperatuur afneemt. De temperatuur waarbij de moleculen stilstaan en dus snelheid 0 m $s^{-1}$ hebben, noemde hij het **absolute nulpunt** ofwel 0 kelvin (0 K). Een lagere temperatuur dan 0 kelvin bestaat niet.
Het verband tussen de temperatuur $T$ in graden Celsius en de absolute temperatuur $T$ in kelvin luidt:

$$T_{\text{Celsius}} = T_{\text{kelvin}} - 273{,}15$$

### Voorbeeldopgave 5

Een bekerglas met water heeft een temperatuur van 20 °C. Het bekerglas wordt verhit waardoor de temperatuur stijgt tot 60 °C.
Bereken de temperatuurstijging $\Delta T$ van het bekerglas water in graden Celsius en in kelvin.

*Uitwerking*
In graden Celsius: $\Delta T = T_{\text{eind}} - T_{\text{begin}} = 60 - 20 = 40$ °C
In kelvin:
20 °C = 20 + 273,15 = 293 K
60 °C = 60 + 273,15 = 333 K
$\Delta T = 333 - 293 = 40$ K
De temperatuurstijging is in graden Celsius even groot als in kelvin. Dit is altijd zo.

## Soortelijke warmte

Als je in de zomerzon aan de rand van een zwembad loopt, merk je dat de stenen tegels op de grond een hoge temperatuur hebben. Je kunt nauwelijks stil blijven staan, zo heet zijn de tegels. Als je vervolgens het trapje van het zwembad af loopt, wordt het een stuk kouder aan je voeten. De temperatuur van het zwembadwater is dus een stuk lager. Dat lijkt misschien vreemd, want de zon schijnt even fel op de stenen tegels als op het water. Blijkbaar stijgt het water veel langzamer in temperatuur dan de stenen tegels. Dat kun je ook iets natuurkundiger zeggen: er is meer warmte nodig om water in temperatuur te laten stijgen dan om de stenen tegels in temperatuur te laten stijgen. Hiervoor is het begrip ‘soortelijke warmte’ ingevoerd. De **soortelijke warmte** is de hoeveelheid warmte die nodig is om één kilogram van een stof één kelvin of één graad Celsius in temperatuur te laten stijgen. Je kunt de soortelijke warmte berekenen met de formule:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Hierin is:
- $c$ de soortelijke warmte in joule per kilogram per kelvin (J $kg^{-1}$ $K^{-1}$) of joule per kilogram per graad Celsius (J $kg^{-1}$ $°C^{-1}$);
- $Q$ de toegevoerde warmte in joule (J);
- $m$ de massa in kilogram (kg);
- $\Delta T$ de temperatuurverandering in kelvin of graden Celsius (K of °C).

Vaak gebruik je de volgende vorm van de formule: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

**Voorbeeldopgave 6**

Je hebt een stof met een soortelijke warmte van $1{,}6 \cdot 10^3$ J $kg^{-1}$ $K^{-1}$.
Bereken hoeveel warmte nodig is om 60 g van deze stof in temperatuur te laten stijgen van 15 °C tot 175 °C.

*Uitwerking*
Gegevens:
$c = 1{,}6 \cdot 10^3$ J $kg^{-1}$ $K^{-1}$
$m = 60$ g $= 0{,}060$ kg
$\Delta T = 175 - 15 = 160$ °C
Formule: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$
$Q = 1{,}6 \cdot 10^3 \times 0{,}060 \times 160 = 1{,}5 \cdot 10^4$ J

Er moet warmte worden toegevoerd om een stof in temperatuur te laten stijgen. Als die stof in temperatuur daalt, komt er juist warmte vrij. Je kunt de formule $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ daarom ook gebruiken als de temperatuur van een stof daalt. Dan is $Q$ de vrijgekomen warmte en $\Delta T$ de temperatuurdaling. De temperatuurdaling $\Delta T$ wordt ook hierbij als een positieve waarde opgeschreven.

De soortelijke warmte is een stofeigenschap. Dat betekent dat je een stof kunt herkennen aan de soortelijke warmte. In Binas tabel 8 tot en met 12 kun je de soortelijke warmte van allerlei stoffen vinden. Vergeet de factor niet die boven de kolom staat, waarmee je alle waarden moet vermenigvuldigen. De soortelijke warmte van bijvoorbeeld goud is dus niet 0,129 J $kg^{-1}$ $K^{-1}$, maar $0{,}129 \cdot 10^3$ J $kg^{-1}$ $K^{-1}$.

Water heeft een heel grote soortelijke warmte. Dat verklaart waarom water op een warme zomerdag een veel lagere temperatuur heeft dan stenen tegels aan het zwembad. Steen heeft namelijk een veel kleinere soortelijke warmte.

## Verband tussen dichtheid en soortelijke warmte bij metalen

Van vijf metalen zijn in tabel 1 de dichtheid en de soortelijke warmte naast elkaar gezet.

▼ **tabel 1** dichtheid en soortelijke warmte van enkele metalen

| metaal | atoommassa (u) | dichtheid ($kg\ m^{-3}$) | soortelijke warmte ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| beryllium | 9,012 u (= $1{,}496 \cdot 10^{-26}$ kg) | $1{,}85 \cdot 10^3$ | $1{,}8 \cdot 10^3$ |
| aluminium | 26,98 u (= $4{,}479 \cdot 10^{-26}$ kg) | $2{,}70 \cdot 10^3$ | $0{,}88 \cdot 10^3$ |
| chroom | 52,00 u (= $8{,}632 \cdot 10^{-26}$ kg) | $7{,}19 \cdot 10^3$ | $0{,}45 \cdot 10^3$ |
| zilver | 107,9 u (= $1{,}791 \cdot 10^{-25}$ kg) | $10{,}5 \cdot 10^3$ | $0{,}24 \cdot 10^3$ |
| platina | 195,1 u (= $3{,}239 \cdot 10^{-25}$ kg) | $21{,}5 \cdot 10^3$ | $0{,}13 \cdot 10^3$ |

Uit tabel 1 blijkt het volgende: hoe groter de dichtheid van een metaal, des te kleiner de soortelijke warmte. Je hebt dus minder warmte nodig om 1 kg van een stof met een grote dichtheid 1 K in temperatuur te laten stijgen dan 1 kg van een stof met een kleine dichtheid. Dat kun je als volgt verklaren: als je een metaal in temperatuur laat stijgen, voer je warmte (energie) toe aan dat metaal. Dan krijgt elk atoom meer energie. In stoffen met een grote dichtheid zitten atomen die zwaar zijn. Daardoor zitten er in 1 kg van zo'n stof in verhouding maar weinig atomen. Dat betekent dat je maar weinig atomen extra energie hoeft te geven. Er is dus weinig energie nodig om 1 kg van deze stof in temperatuur te laten stijgen. Deze stof heeft dus een kleine soortelijke warmte.
De **atoommassa** in tabel 1 geeft aan hoe zwaar een atoom is. De atoommassa wordt uitgedrukt in zogenoemde atomaire massa-eenheden u. Er geldt: 1 u = $1{,}660\,54 \cdot 10^{-27}$ kg (Binas tabel 7). Je kunt de atoommassa van atomen opzoeken in Binas tabel 99. Daar wordt deze de relatieve atoommassa genoemd.

▶ **EXPERIMENT 2** De soortelijke warmte van een metalen blokje

### Onthoud!

- Warmte is een vorm van energie. Warmte wordt aangeduid met het symbool $Q$ en uitgedrukt in de eenheid joule (J).
- Temperatuur is een maat voor de gemiddelde snelheid van de moleculen. Temperatuur wordt aangeduid met het symbool $T$ en uitgedrukt in de eenheid kelvin (K) of graden Celsius (°C).
- $T_{Celsius} = T_{kelvin} - 273{,}15$
- De soortelijke warmte is de hoeveelheid warmte die nodig is om één kilogram stof één kelvin of één graad Celsius in temperatuur te laten stijgen. Je kunt de soortelijke warmte berekenen met de formule $c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$. Deze formule kun je ook schrijven als $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$.
- Hoe groter de dichtheid van een metaal, des te kleiner de soortelijke warmte.

### Opdrachten

**21** Warmte en temperatuur
Maak de volgende opdrachten.
**a** Leg het verschil uit tussen warmte en temperatuur.
**b** Geef de formule voor het omrekenen van kelvin naar graden Celsius.
**c** Wat wordt verstaan onder de soortelijke warmte van een stof?
**d** Met welke formule kun je de soortelijke warmte van een stof berekenen?
**e** In welke eenheden moet je de grootheden in deze formule uitdrukken?
**f** Welk verband is er tussen de dichtheid van een metaal en de soortelijke warmte?

**22** Omrekenen

Neem over en reken om. Geef je antwoord in drie significante cijfers.

**a** 0,00 °C = … K
**b** 0,00 K = … °C
**c** 100 °C = … K
**d** 100 K = … °C

**23** Temperatuurstijging

De temperatuur van een voorwerp stijgt van 20 °C naar 80 °C.
Bereken de temperatuurstijging in graden Celsius en in kelvin.

**24** Warmte

Bereken hoeveel warmte nodig is om 600 g ijzer te verhitten van 50 °C tot het smeltpunt.

**25** Nikkelen beeldje

Een beeldje bestaat uit 150 $cm^3$ nikkel. Het beeldje staat in een kamer waar het 20 °C is. Er wordt $7{,}5 \cdot 10^3$ J warmte toegevoerd aan het beeldje.
Bereken de eindtemperatuur van het beeldje.

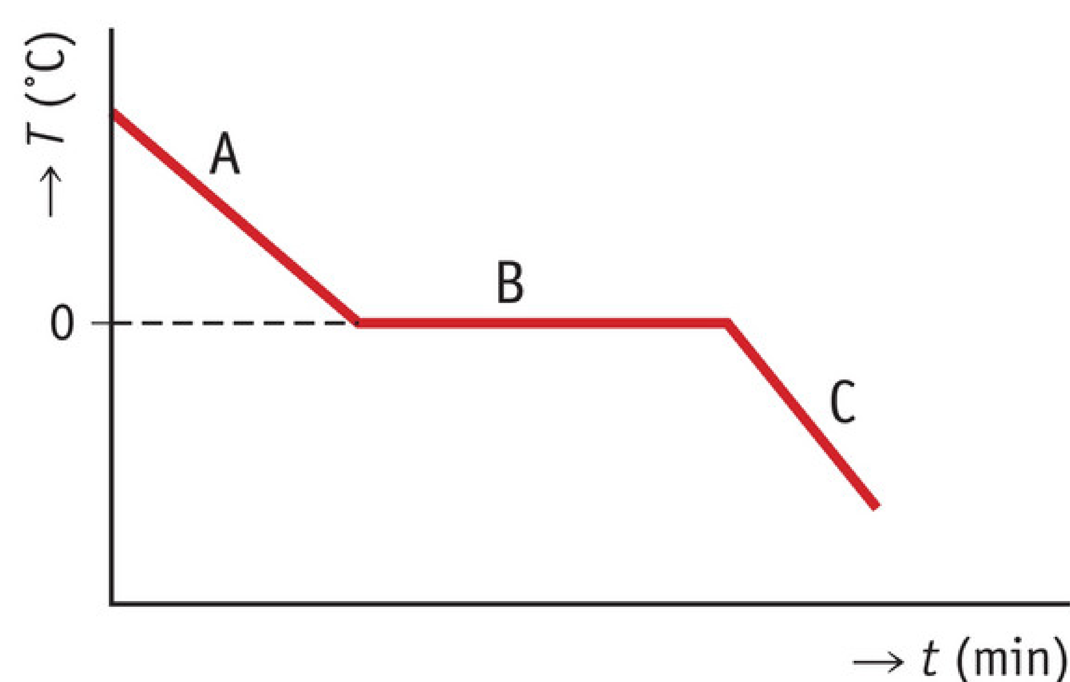
**26** Boiler

In een boiler wordt 25 L water opgewarmd van 15 °C tot 80 °C. De boiler produceert 2000 J warmte per seconde.

**a** Bereken hoeveel warmte nodig is om het water op te warmen.
**b** Bereken hoelang de boiler over dat verwarmen doet. Ga er hierbij van uit dat alle geproduceerde warmte van de boiler door het water wordt opgenomen.

**27** Water afkoelen

Livia koelt 2,00 kg water van 25,0 °C af in de diepvries. Tijdens het afkoelen meet zij de temperatuur en stelt een ($T$,$t$)-diagram op (figuur 10). In de grafiek zijn drie trajecten aangegeven met A, B en C.




▲ **figuur 10** het ($T$,$t$)-diagram van water

Geef voor elk van de trajecten A, B, en C aan:

**a** in welke fase het water zich bevindt.
**b** of de snelheid van de moleculen toeneemt, gelijk blijft of afneemt in de tijd.
**c** of de afstand tussen de moleculen toeneemt, gelijk blijft of afneemt in de tijd.
**d** Toon met een berekening aan dat het water in traject A $209 \cdot 10^3$ J warmte afstaat aan de omgeving.
**e** De smeltwarmte van een stof geeft aan hoeveel warmte vrijkomt als één kg van een stof stolt.
Zoek in Binas de smeltwarmte van water op en bereken hoeveel warmte aan de omgeving wordt afgestaan in traject B.

**28** Afkoelen

Een roestvrij stalen radiator heeft een massa van 82 kg en is gevuld met 16 L water.
De radiator koelt 's nachts af van 50 °C tot 16 °C.
Voor de hoeveelheid warmte die een stof afstaat, geldt:

$$Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T$$

Hierin is:

- $Q$ de afgestane warmte in joule (J);
- $c$ de soortelijke warmte in joule per kilogram per kelvin (J $kg^{-1}$ $K^{-1}$);
- $\rho$ de dichtheid in kilogram per kubieke meter (kg $m^{-3}$);
- $V$ het volume in kubieke meter ($m^3$);
- $\Delta T$ de temperatuursverandering in kelvin (K).

**a** Leid deze formule af met behulp van formules uit Binas tabel 35.
**b** Bereken de hoeveelheid warmte die de radiator afstaat.

Een radiator kan in plaats van met water ook met olie gevuld zijn. Dit wordt vaak gedaan in elektrische radiatoren. In tabel 2 staan de eigenschappen van olie en water.

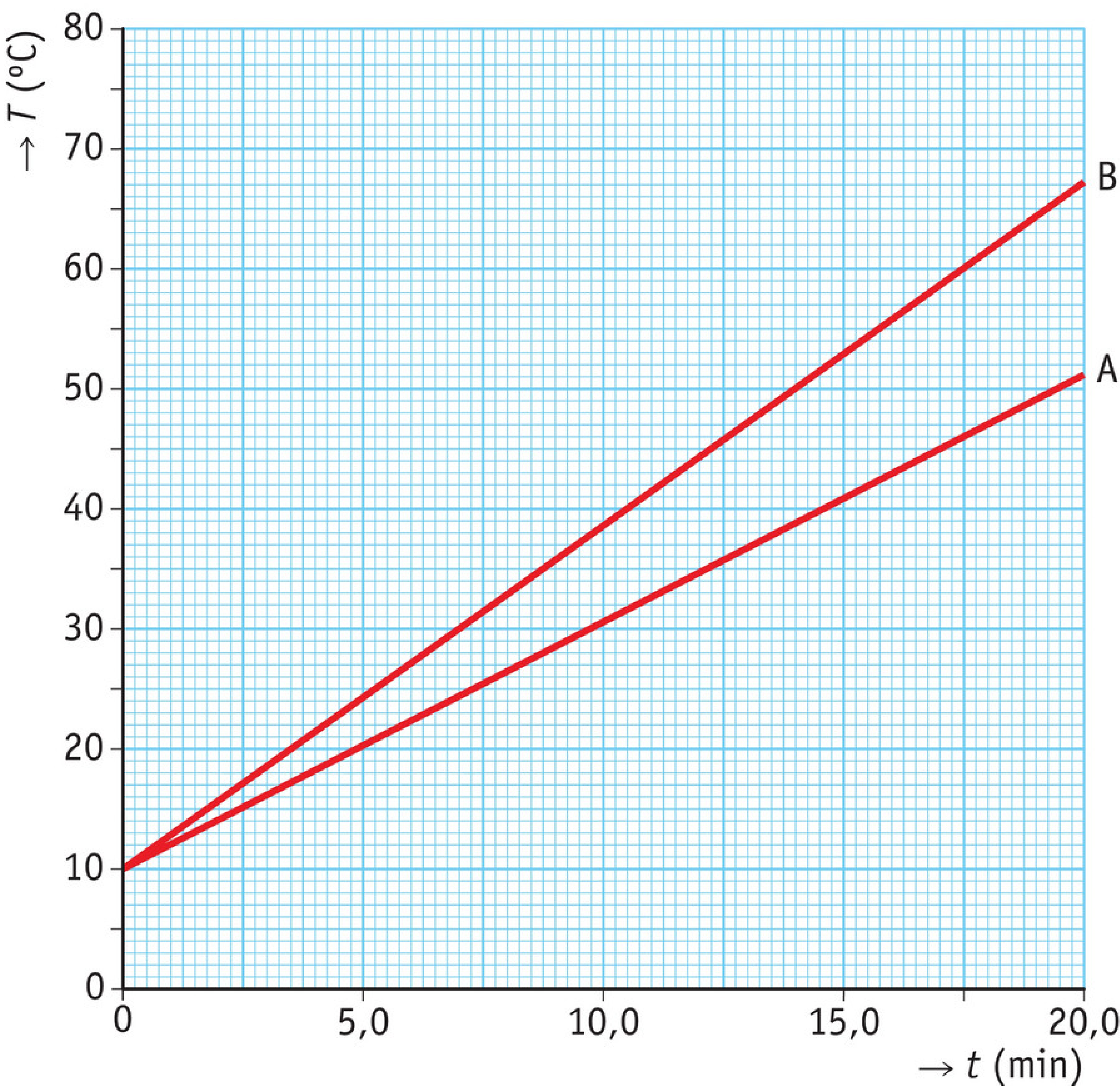
▼ **tabel 2** dichtheid en soortelijke warmte van olie en water

| | dichtheid (kg $m^{-3}$) | soortelijke warmte (J $kg^{-1}$ $K^{-1}$) |
|---|---|---|
| olie | $0{,}900 \cdot 10^3$ | $1{,}65 \cdot 10^3$ |
| water | $0{,}998 \cdot 10^3$ | $4{,}18 \cdot 10^3$ |

**c** Bepaal met behulp van de afgeleide formule welke vloeistof in tabel 2 de minste warmte afstaat op het moment dat de radiator wordt uitgeschakeld.
**d** Leg uit waarom in elektrische radiatoren de toepassing van olie de voorkeur verdient boven die van water.

**29** Vloeistoffen verwarmen

Aukje verhit 300 g van vloeistof A en 300 g van vloeistof B. Het verwarmingselement geeft elke seconde 25 J warmte af. In figuur 11 zie je de temperatuur $T$ van de vloeistoffen als functie van de tijd $t$.




◀ **figuur 11** het ($T$,$t$)-diagram van twee vloeistoffen

**a** Leg zonder berekeningen uit welke van de twee vloeistoffen de grootste soortelijke warmte heeft.
**b** Bepaal de soortelijke warmte van elk van de twee vloeistoffen.
**c** Bepaal met behulp van Binas welke stoffen vloeistof A en B waarschijnlijk zijn.
**d** Leg uit waarom bij opdracht c 'waarschijnlijk' staat.

**30** Dichtheid en soortelijke warmte
Maak de volgende opdrachten.
**a** Maak een grafiek waarin je de soortelijke warmte uitzet tegen de dichtheid van de metalen uit Binas tabel 8.

Het vermoeden bestaat dat de soortelijke warmte van een metaal omgekeerd evenredig is met de dichtheid. Dat betekent dat de soortelijke warmte van een metaal 2× zo groot is, als de dichtheid 2× zo klein is.
**b** Leg uit dat in dat geval de dichtheid van een metaal maal zijn soortelijke warmte, dus $\rho \cdot c$, voor alle metalen constant moet zijn.
**c** Ga na of dit vermoeden klopt voor de metalen uit Binas tabel 8.

**+31** Vloeistoffen mengen
France mengt 200 g water van 30,0 °C met een onbekende hoeveelheid alcohol van 52,0 °C. Nadat France beide vloeistoffen door elkaar heeft geroerd, meet zij de temperatuur. Deze blijkt 40,0 °C te zijn. Verwaarloos bij de volgende vragen de warmte-uitwisseling met de omgeving.
**a** Bereken hoeveel warmte het water heeft opgenomen.
**b** Bereken hoeveel gram alcohol France met het water heeft gemengd.

# 4 Warmtetransport

In deze paragraaf leer je:
- de drie vormen van warmtetransport (geleiding, stroming en straling) toe te passen;
- het verband uitleggen tussen warmtestroom en warmtegeleidingscoëfficiënt;
- de warmtestroom door (geïsoleerde) muren te berekenen.

Warmte verplaatst zich altijd van een hoge temperatuur naar een lage. Als je een glas heet water een tijdje laat staan, koelt het water af. Na verloop van tijd heeft het water dezelfde temperatuur gekregen als de kamer waarin het glas water zich bevindt. Het glas water heeft warmte (energie) afgestaan aan de lucht en de tafel waarop het glas staat.

## Warmtetransport

Als heet water afkoelt, is er warmteoverdracht van het water naar de omgeving. In de natuurkunde wordt dit **warmtetransport** genoemd.

Er zijn drie manieren van warmtetransport:
1 geleiding;
2 stroming;
3 straling.

## Geleiding

Als je een metalen lepel een tijdje in heet water laat staan, wordt de lepel zo heet dat je hem niet meer kunt vastpakken. Warmte verplaatst zich, door de lepel heen, van de onderkant van die lepel naar de bovenkant. Deze vorm van warmtetransport heet **geleiding**. Geleiding kun je op de volgende manier verklaren. Het water heeft een hoge temperatuur doordat de moleculen een grote snelheid hebben. Ze botsen tegen de moleculen in dat deel van de lepel dat zich in het water bevindt. Bij die botsingen dragen de watermoleculen energie (warmte) over aan de moleculen onder in de lepel. Die gaan daardoor harder trillen op hun plaats waarbij ze steeds meer plaats nodig hebben. Daardoor botsen deze moleculen steeds harder tegen hun buren die daardoor ook weer harder gaan trillen. Zo wordt de warmte doorgegeven. Let op: de warmte wordt doorgegeven, maar de moleculen zelf blijven op hun plaats.

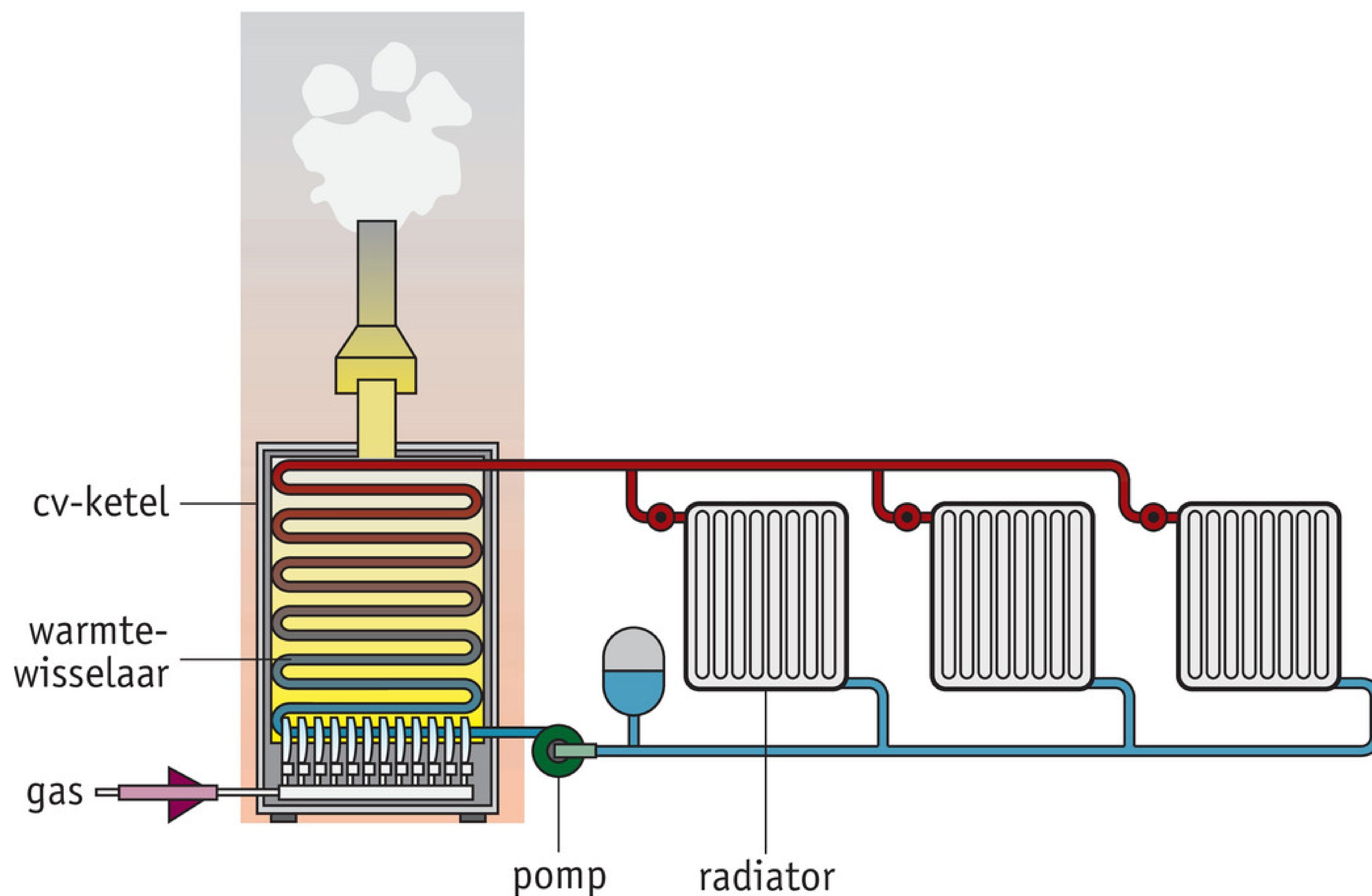
## Stroming

In figuur 12 zie je een ringvormige buis die is gevuld met water. Aan het water worden een paar druppeltjes inkt toegevoegd om de beweging van het water zichtbaar te maken. Als je deze ringvormige buis op één plaats verhit, gaat het water stromen. Het water neemt daarbij de warmte mee. Deze vorm van warmtetransport heet **stroming**. Bij stroming verplaatst zich de warmte samen met de moleculen.
In figuur 12 stroomt het water tegen de klok in. Dat kun je als volgt verklaren: op de plaats waar het water wordt verhit, zet het water uit en krijgt daardoor een kleinere dichtheid. Het water stijgt en duwt het koudere water erboven voor zich uit.



▲ **figuur 12** stroming in een ringvormige buis

Stroming kan alleen optreden bij vloeistoffen en gassen. De centraleverwarmingsinstallatie is een voorbeeld van warmtetransport door stroming (figuur 13). Het water wordt verhit in de ketel en gaat daardoor door de buizen en de radiatoren stromen. Eigenlijk heb je hierbij geen pomp nodig. Toch heeft een verwarmingsketel wel een pomp om de stroming sterker en gelijkmatiger te maken.




▲ **figuur 13** schematische voorstelling van een cv-installatie

## Straling

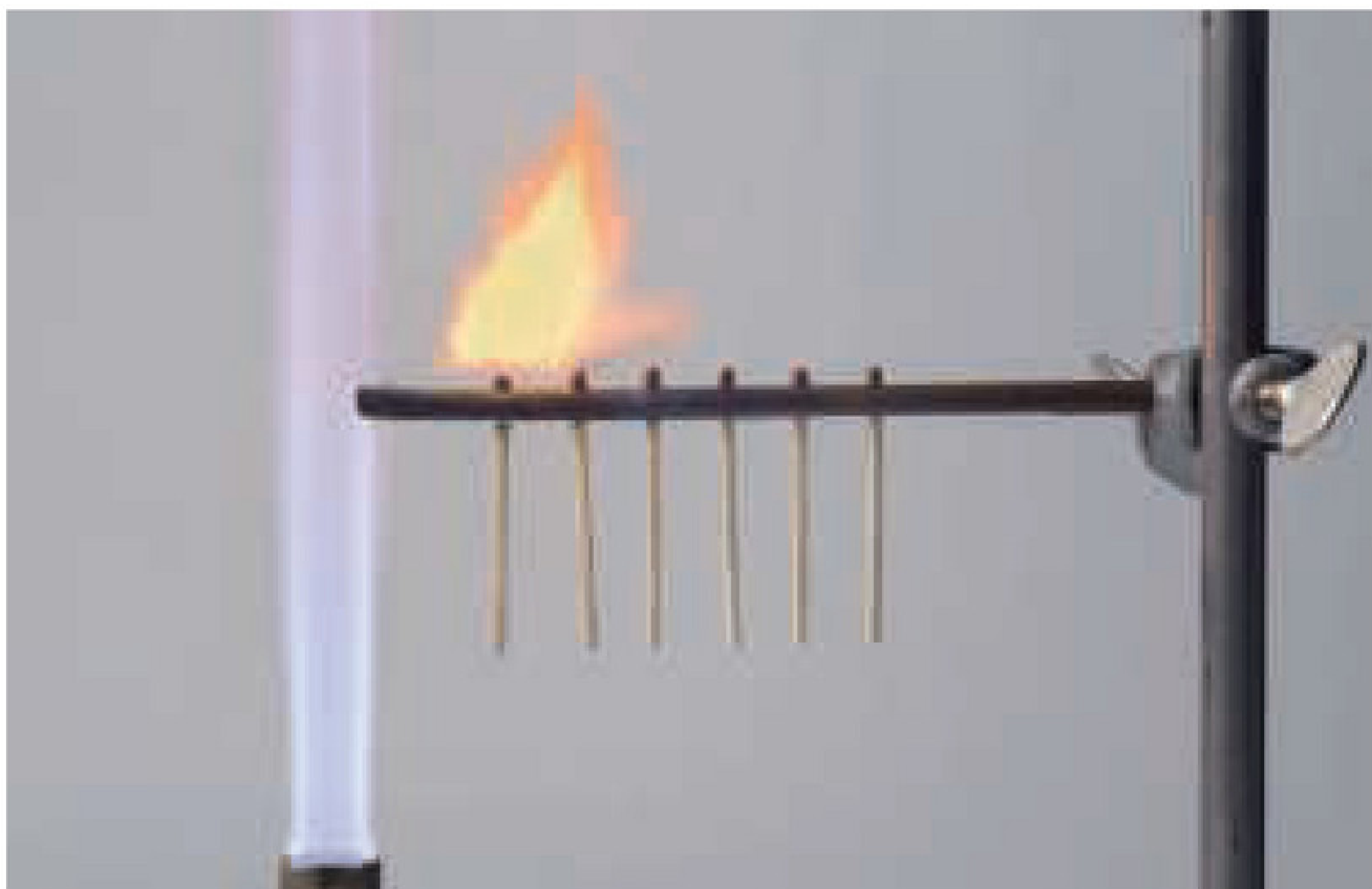
Stroming en geleiding kunnen niet de enige vormen van warmtetransport zijn. Er komt namelijk zonnewarmte op aarde en dat kan niet door stroming of geleiding. Het grootste deel van de ruimte tussen de zon en de aarde is vacuüm (luchtledig), dus kan er niets stromen en is geleiding ook niet mogelijk. De derde vorm van warmtetransport heeft blijkbaar geen stof (moleculen) nodig. Deze derde vorm van warmtetransport is **straling**.
Als straling op een voorwerp valt, kan de straling worden teruggekaatst, geabsorbeerd of doorgelaten. Straling die wordt geabsorbeerd, wordt omgezet in warmte.
Met zonnestraling die op een ruit valt, gebeurt dit allemaal tegelijkertijd. Een groot deel van de straling wordt doorgelaten, want binnen in de kamer is het licht. Een klein deel van de straling wordt geabsorbeerd, want de ruit voelt warm aan als je deze aanraakt. Ten slotte wordt ook nog een klein deel van de straling teruggekaatst.

Hoeveel straling een oppervlakte absorbeert, hangt af van de kleur, aard en grootte van het oppervlak. Een donkergekleurd oppervlak absorbeert meer straling dan een lichtgekleurd oppervlak. Een ruw oppervlak absorbeert meer straling dan een glad oppervlak. Een groot oppervlak absorbeert meer straling dan een klein oppervlak. Verder speelt ook de hoek waaronder de straling op een oppervlak valt een rol. Hoe loodrechter de straling op het oppervlak valt, des te meer straling dat oppervlak absorbeert.
Een voorwerp dat veel straling absorbeert, kan ook veel straling uitzenden. Zo zendt een groot ruw zwart oppervlak veel meer straling uit dan een klein wit glad oppervlak met dezelfde temperatuur. De temperatuur van het voorwerp is ook nog van belang. Hoe hoger de temperatuur van een voorwerp, des te meer straling het uitzendt.

## Warmtetransport

Als je het vrije uiteinde van een metalen staaf verhit met een brander, trekt de warmte door geleiding door de staaf heen. Toch krijgt het vaste uiteinde niet dezelfde hoge temperatuur als de verhitte vrije kant. In figuur 14 zie je een experiment dat dit bewijst. In de metalen staaf zijn

lucifers bevestigd. Als de staaf links wordt verhit, ontbrandt de lucifer het dichtst bij het verhitte uiteinde als eerste. De tweede lucifer ontbrandt wat later en de derde nog later. De vierde, vijfde en zesde lucifers ontbranden helemaal niet, hoelang je ook blijft verhitten. Er ontstaat een temperatuurverloop over de hele staaf van links naar rechts. De hoeveelheid warmte die per seconde door de staaf wordt getransporteerd, heet de **warmtestroom *P***.



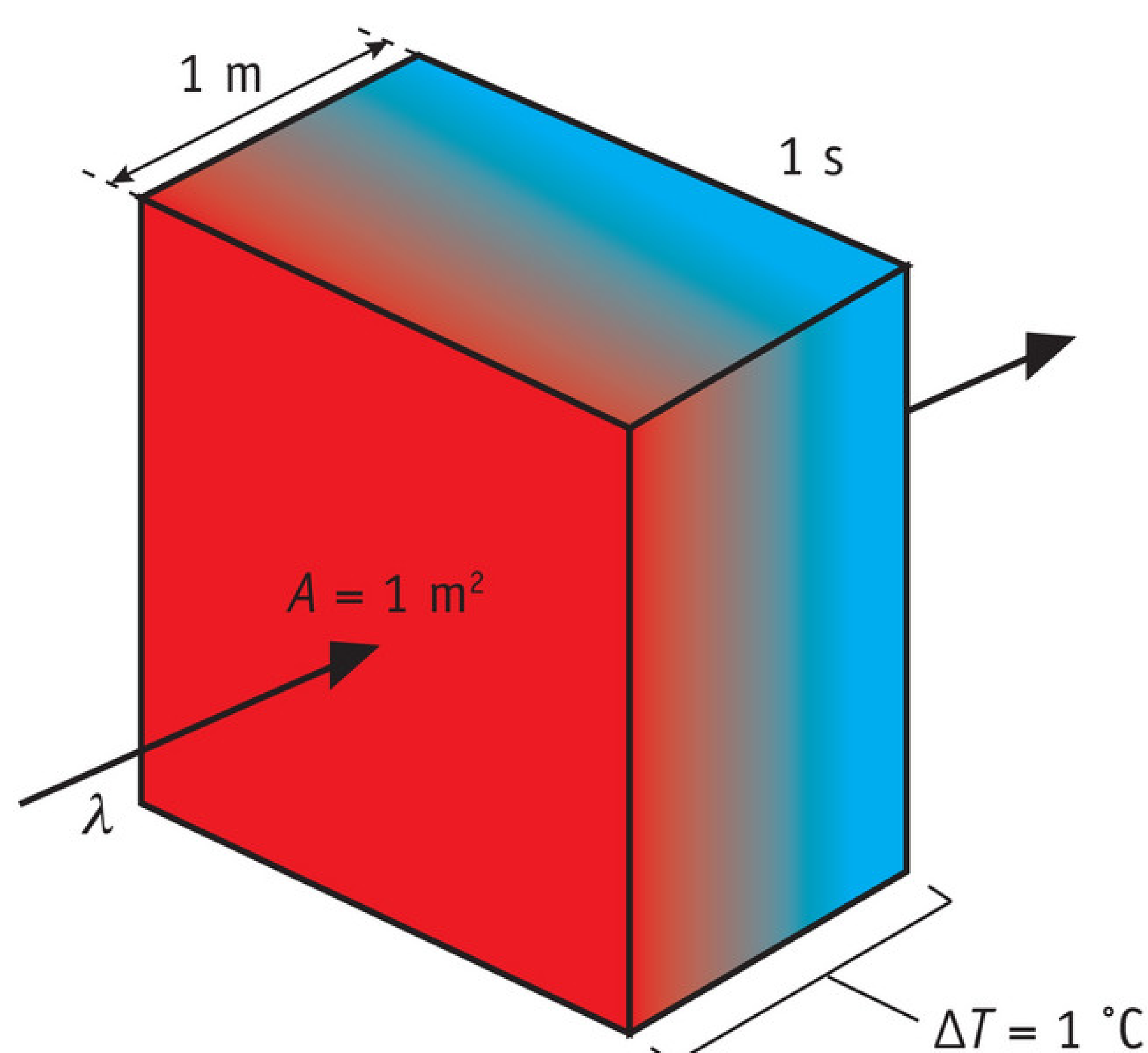
▲ **figuur 14** warmtetransport door een metalen staaf

Er treedt niet alleen een warmtestroom op bij een staaf waarvan beide uiteinden een verschillende temperatuur hebben, maar ook bij een muur. Zo gaat er in een strenge winter een deel van de warmte in huis door geleiding via muren naar buiten. Warmte verplaatst zich namelijk altijd van een hoge temperatuur naar een lage temperatuur.
De warmtestroom, oftewel de hoeveelheid warmte die per seconde door een muur gaat, bereken je met:

$$P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

Hierin is:
- $P$ de warmtestroom in joule per seconde ($J\ s^{-1}$) of watt (W);
- $\lambda$ de warmtegeleidingscoëfficiënt in watt per meter per kelvin ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) of watt per meter per graad Celsius ($W\ m^{-1}\ °C^{-1}$);
- $A$ de oppervlakte van de muur in vierkante meter ($m^2$);
- $\Delta T$ het temperatuurverschil aan weerszijden van de muur in kelvin of graden Celsius (K of °C);
- $d$ de dikte van de muur in meter (m).

De **warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda$** is de hoeveelheid warmte die per seconde door een oppervlakte van één vierkante meter gaat als het temperatuurverschil aan weerszijden van een één meter dikke muur één kelvin of één graad Celsius is (figuur 15).




◀ **figuur 15** schematische voorstelling van de warmtegeleidingscoëfficiënt

De warmtegeleidingscoëfficiënt, die ook wel thermische geleidbaarheid of thermisch geleidingsvermogen wordt genoemd, geeft dus aan hoe goed het materiaal warmte geleidt. Hoe groter $\lambda$, hoe beter het materiaal warmte geleidt. De warmtegeleidingscoëfficiënt is een stofeigenschap. In Binas tabel 8 tot en met 12 is de warmtegeleidingscoëfficiënt van een groot aantal stoffen vermeld.
Als je de warmtestroom $P$ kent, kun je de warmte die in een bepaalde tijd door een muur gaat uitrekenen met:

$$Q = P \cdot t$$

Hierin is:
- $Q$ de warmte in joule (J);
- $P$ de warmtestroom in joule per seconde (J $s^{-1}$) of watt (W);
- $t$ de tijdsduur in seconde (s).

**Voorbeeldopgave 7**

Een kamer heeft vier muren die elk 4,0 bij 3,0 m zijn. In de kamer is het 22 °C. Aan de andere kant van de muren is het voortdurend 10 °C. Alle muren zijn 20 cm dik.
Bereken hoeveel warmte er in 24 uur door de muren verdwijnt als de warmtegeleidingscoëfficiënt van de muren 0,70 W $m^{-1}$ $K^{-1}$ is.

*Uitwerking*
Gegevens:
$\lambda = 0{,}70$ W $m^{-1}$ $K^{-1}$
$\Delta T = 22 - 10 = 12$ °C = 12 K
$d = 20$ cm = 0,20 m
$A_{muur} = 4{,}0 \times 3{,}0 = 12$ $m^2$
$A_{totaal} = 4 \times 12 = 48$ $m^2$ (vier muren)

Formules: $P = \lambda \cdot A \cdot \dfrac{\Delta T}{d}$ en $Q = P \cdot t$

$$P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} = 0{,}70 \times 48 \times \frac{12}{0{,}20} = 2{,}0 \cdot 10^3 \text{ W}$$

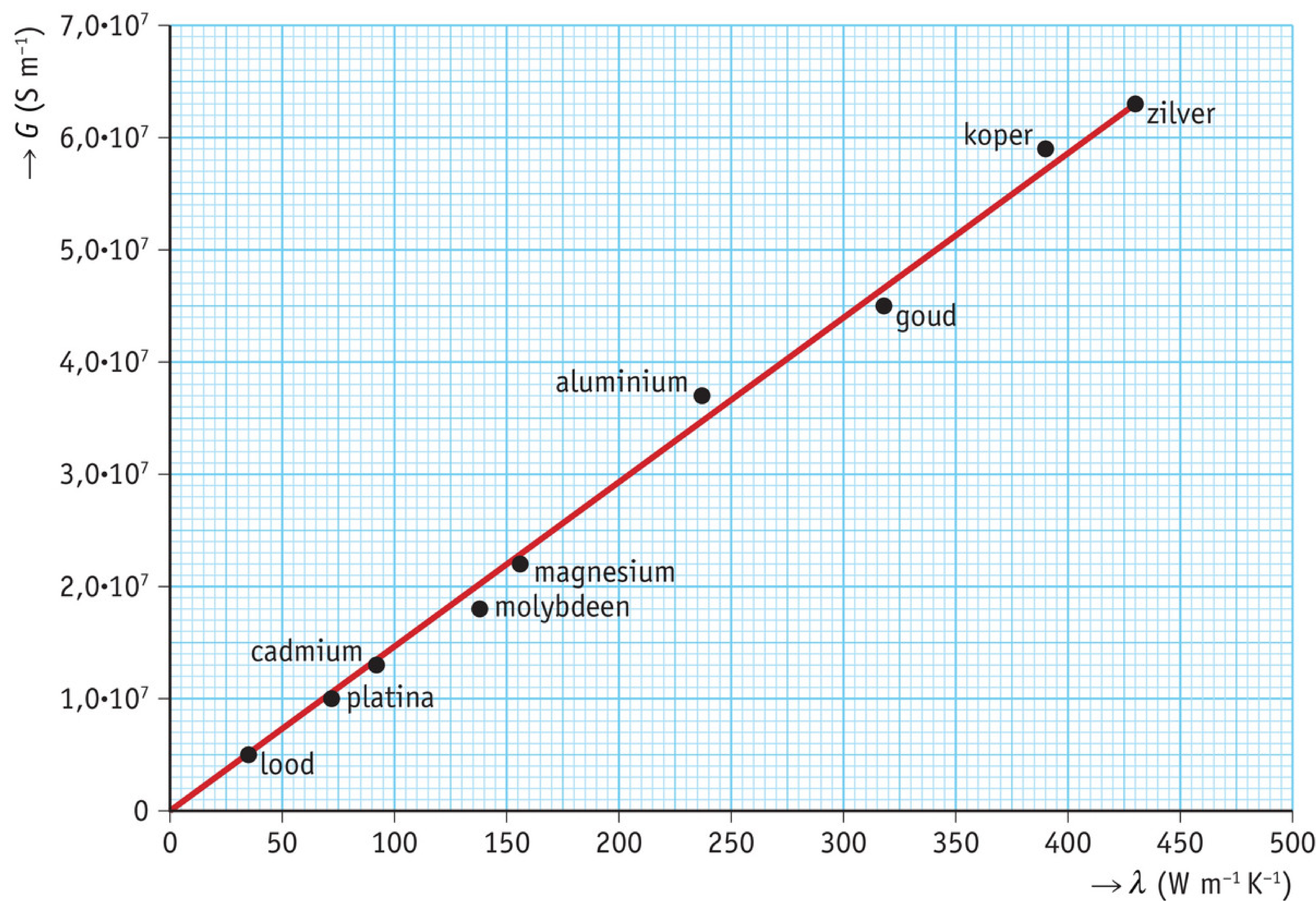
$t = 24$ h $= 24 \times 60 \times 60 = 86\,400$ s
$Q = P \cdot t = 2{,}0 \cdot 10^3 \times 86\,400 = 1{,}7 \cdot 10^8$ J

## Isolatoren en geleiders

Als je een houten lepel een tijdje in een heet glas water laat staan, kun je die lepel daarna zonder problemen vastpakken. De houten lepel wordt niet warm. Hout is een slechte warmtegeleider. Slechte warmtegeleiders worden **warmte-isolatoren** of isolatoren genoemd. Voorbeelden van isolatoren zijn glas, hout, papier, plastic, steen, bakeliet en textiel. Deze stoffen hebben een kleine warmtegeleidingscoëfficiënt. Ook vloeistoffen (met uitzondering van kwik) en gassen geleiden warmte slecht. Dat laatste komt doordat de moleculen in een vloeistof en een gas ver uit elkaar zitten.

Stoffen die warmte goed geleiden, heten **warmtegeleiders** of ook wel geleiders. Metalen zijn goede warmtegeleiders en hebben een grote warmtegeleidingscoëfficiënt. In hoofdstuk 2 heb je gezien dat metalen ook goede elektrische geleiders zijn. Dat dit geen toeval is, kun je zien in het (elektrische geleiding,warmtegeleiding)-diagram van figuur 16. Metalen die de elektrische stroom goed geleiden, zijn ook goede warmtegeleiders. Het mechanisme achter de goede elektrische geleiding en warmtegeleiding zijn de **geleidingselektronen**. Dat zijn de vrije elektronen

die zich gemakkelijk door het metaal kunnen bewegen. Als deze elektronen van de ene kant van het metaal naar de andere kant van het metaal bewegen, nemen ze naast hun lading ook energie mee. Er kan zich dus gemakkelijk lading en energie verplaatsen door het metaal, wat de goede elektrische geleiding en warmtegeleiding verklaart.

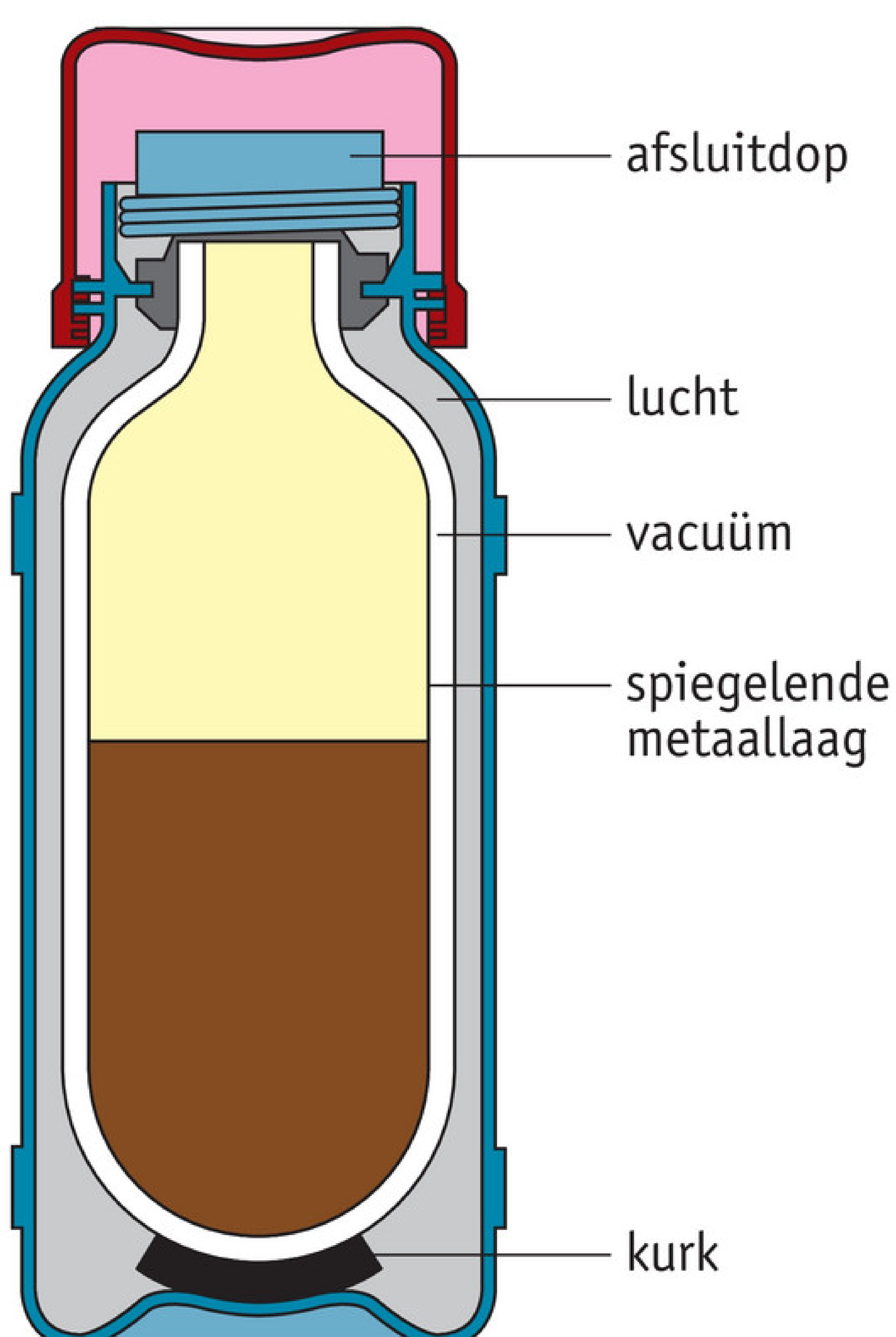



▲ **figuur 16** het (elektrische geleiding,warmtegeleiding)-diagram van metalen

Of een vaste stof een geleider of isolator is, hangt onder andere af van de aantrekkingskrachten tussen de moleculen en hoe die moleculen in de vaste stof zijn gerangschikt.

## Isolatie

Bij de bouw van een huis worden maatregelen genomen om warmtetransport zo veel mogelijk te voorkomen. Dat kan onder andere door toepassing van dubbelglas. Tussen de twee lagen glas bevindt zich stilstaande lucht. Lucht is een isolator. Tegenwoordig worden alle huizen gebouwd met een spouwmuur. De opening tussen de twee muren, de spouw, wordt gevuld met een isolator: glaswol of schuim. Ook de vloer en het dak worden vaak geïsoleerd.

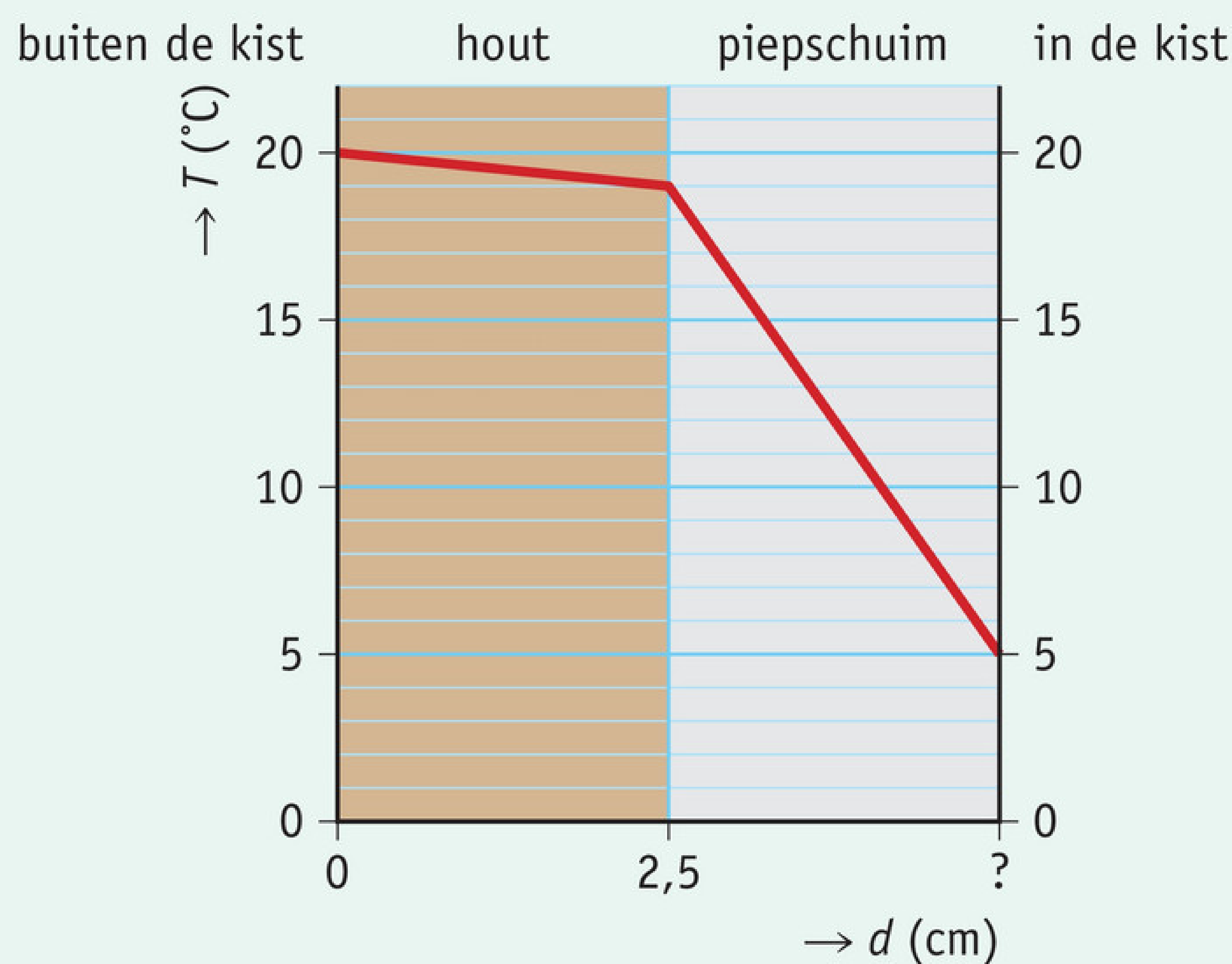



Een thermosfles is op verschillende manieren goed geïsoleerd (figuur 17). De afsluitdop voorkomt dat er warme damp uit de thermoskan stroomt. De thermosfles heeft een binnen- en een buitenwand. De ruimte tussen deze twee wanden is vacuüm gepompt waardoor er geen geleiding en stroming plaatsvinden. De binnenwand is spiegelend waardoor straling wordt teruggekaatst.

◀ **figuur 17** doorsnede van een thermosfles

**Voorbeeldopgave 8**

Een houten kist ($\lambda$ = 0,50 W m$^{-1}$ K$^{-1}$) met wanden van 2,5 cm dik wordt aan de binnenkant met piepschuim ($\lambda$ = 0,035 W m$^{-1}$ K$^{-1}$) geïsoleerd. Het temperatuurverloop van buiten naar binnen is als functie van de dikte weergegeven in figuur 18. Buiten de kist is het 20,0 °C en in de kist 5,0 °C.




▲ **figuur 18** het ($T$,$d$)-diagram van een geïsoleerde kist

**a** Bereken hoeveel warmte per seconde door een oppervlakte van 1,0 m$^2$ de kist in stroomt.
**b** Bereken de dikte van het piepschuim.

*Uitwerking*

**a** Gegevens:
$\lambda_{hout}$ = 0,50 W m$^{-1}$ K$^{-1}$
$d$ = 2,5 cm = 2,5·10$^{-2}$ m
$\Delta T_{hout}$ = 20,0 − 19,0 = 1,0 °C
$A$ = 1,0 m$^2$

Formule: $P = \lambda \cdot A \cdot \dfrac{\Delta T}{d}$

$$P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} = 0{,}50 \times 1{,}0 \times \frac{1{,}0}{2{,}5 \cdot 10^{-2}} = 20 \text{ W} = 20 \text{ J s}^{-1}$$

**b** De warmte die per seconde door 1,0 m$^2$ hout stroomt, zal ook door 1,0 m$^2$ piepschuim stromen.
Gegevens:
$P$ = 20 W
$\lambda_{piepschuim}$ = 0,035 W m$^{-1}$ K$^{-1}$
$\Delta T_{piepschuim}$ = 19,0 − 5,0 = 14,0 °C
$A$ = 1,0 m$^2$
Formule: $P = \lambda \cdot A \cdot \dfrac{\Delta T}{d} \rightarrow d = \dfrac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{P}$

$$d = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{P} = \frac{0{,}035 \times 1{,}0 \times 14{,}0}{20} = 2{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2{,}5 \text{ cm}$$

## Onthoud!

- Warmtetransport kan op drie manieren plaatsvinden: door geleiding, door stroming en door straling.
- Metalen zijn goede warmtegeleiders. Vloeistoffen en gassen zijn slechte warmtegeleiders.
- De warmtestroom door een muur kun je uitrekenen met de formule $P = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$
- Als je de warmtestroom $P$ kent, kun je de warmte die in een bepaalde tijd door een muur gaat uitrekenen met: $Q = P \cdot t$

## Opdrachten

**32** Warmtetransport [1]
Beantwoord de volgende vragen.
**a** Op welke drie manieren kan warmtetransport plaatsvinden?
**b** Beschrijf kort elk van de bij opdracht a genoemde vormen.
**c** Leg uit dat metalen zowel goede warmtegeleiders als goede elektrische geleiders zijn.
**d** Wat wordt verstaan onder de warmtestroom door een muur?
**e** Met welke formule kun je de warmtestroom door een muur berekenen?
**f** In welke eenheden moeten de grootheden in deze formule worden ingevuld?
**g** Leg uit wat onder de warmtegeleidingscoëfficiënt wordt verstaan.

**33** Warmtetransport [2]
Je staat op de badkamer met één voet op een douchemat en met je andere voet op de tegelvloer.
**a** Leg uit dat de tegelvloer en de douchemat dezelfde temperatuur hebben.
**b** Leg uit waarom je ene voet toch kouder aanvoelt dan je andere voet.

**34** Thermosfles
Bekijk de doorsnede van de thermosfles in figuur 17.
Welke vorm(en) van warmtetransport wordt of worden tegengegaan door de volgende onderdelen van de thermosfles?
**a** de spiegelende metaallaag
**b** het vacuüm gedeelte
**c** de kurk

**35** Warmtestroom
Uit een kamer verdwijnt de warmte vooral door het aanwezige raam. Het glas van dit raam is 5,0 mm dik. De breedte van het raam is 2,4 m en de hoogte is 1,2 m. De temperatuur van de lucht in de kamer is 17 °C, buiten is de temperatuur 13 °C.
**a** Bereken de warmtestroom door het raam.

De kamer wordt verwarmd door een kachel die een vermogen levert van 1,50 kW.
**b** Leg uit dat deze kachel de kamer niet op een temperatuur van 17 °C kan houden.
**c** Bereken het vermogen dat een kachel minimaal moet hebben om de temperatuur in de kamer wel op 17 °C te houden.

**36** Dubbelglas

Tegenwoordig heb je naast ruiten van gewoon dubbelglas ook vacuümglas. Bij gewoon dubbelglas bevindt zich droge lucht tussen de twee glasplaten. Bij vacuümglas is de ruimte daartussen vacuüm.

**a** Leg uit dat vacuümglas beter isoleert dan gewoon dubbelglas.

**b** De zogenoemde warmtedoorlatingscoëfficiënt (ook wel *U*-waarde genoemd) voor een ruit van gewoon dubbelglas is 3,5 W $m^{-2}$ $K^{-1}$. De warmtedoorlatingscoëfficiënt voor een ruit van vacuümglas is 1,4 W $m^{-2}$ $K^{-1}$. Op een middag is gedurende 4,0 uur de buitentemperatuur 3,0 °C en de binnentemperatuur 19,0 °C. De kamer die wordt verwarmd, heeft ruiten met een totale oppervlakte van 6,0 $m^2$.
Bereken met behulp van Binas tabel 28B hoeveel kubieke meter Gronings aardgas je in die 4,0 uur bespaart bij gebruik van vacuümglas in plaats van gewoon dubbelglas.

*naar: examen vwo 2007-II*

**37** Warmtegeleidingscoëfficiënt

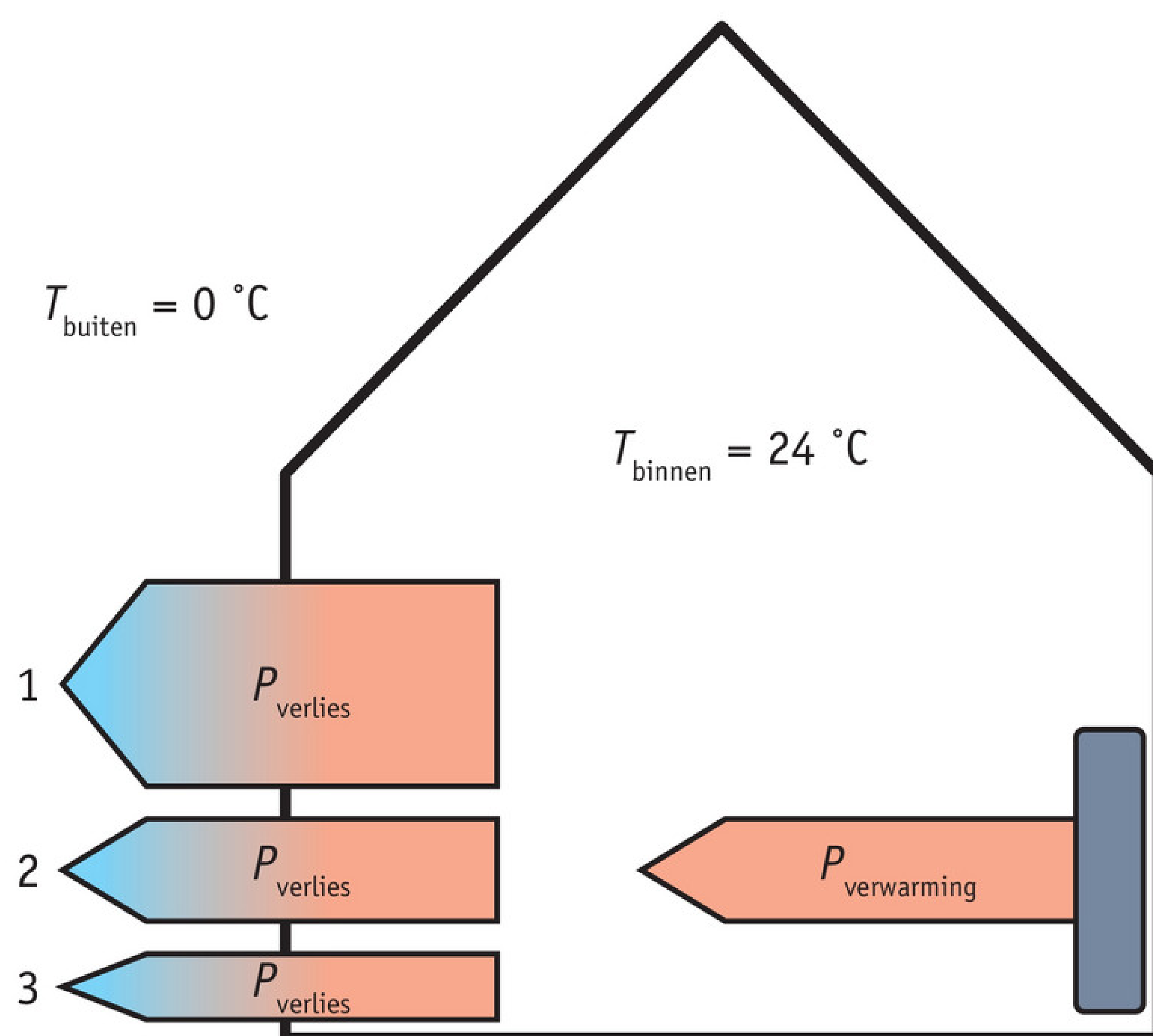
Leg uit wat er met de warmtegeleidingscoëfficiënt en de soortelijke warmte gebeurt als een metaal stolt.

**38** Spouwmuur

De binnentemperatuur in een huis is 24 °C, terwijl de buitentemperatuur 0 °C is. In figuur 19 is het huis getekend waarin pijlen aangeven hoeveel warmte er per seconde wordt toegevoerd ($P_{verwarming}$). In deze figuur staan ook drie genummerde pijlen getekend die de hoeveelheid warmte weergeven die per seconde verloren gaat ($P_{verlies}$). De breedte van de pijlen is een maat voor het vermogen.

**a** Leg uit welke pijl (1, 2 of 3) de gegeven situatie correct weergeeft.

**b** De spouwmuur van het huis kan geïsoleerd zijn of gewoon lucht bevatten.
Welke vorm(en) van warmtetransport vindt of vinden er plaats als de spouwmuur alleen stilstaande lucht bevat?




▲ **figuur 19** warmteverlies in een huis

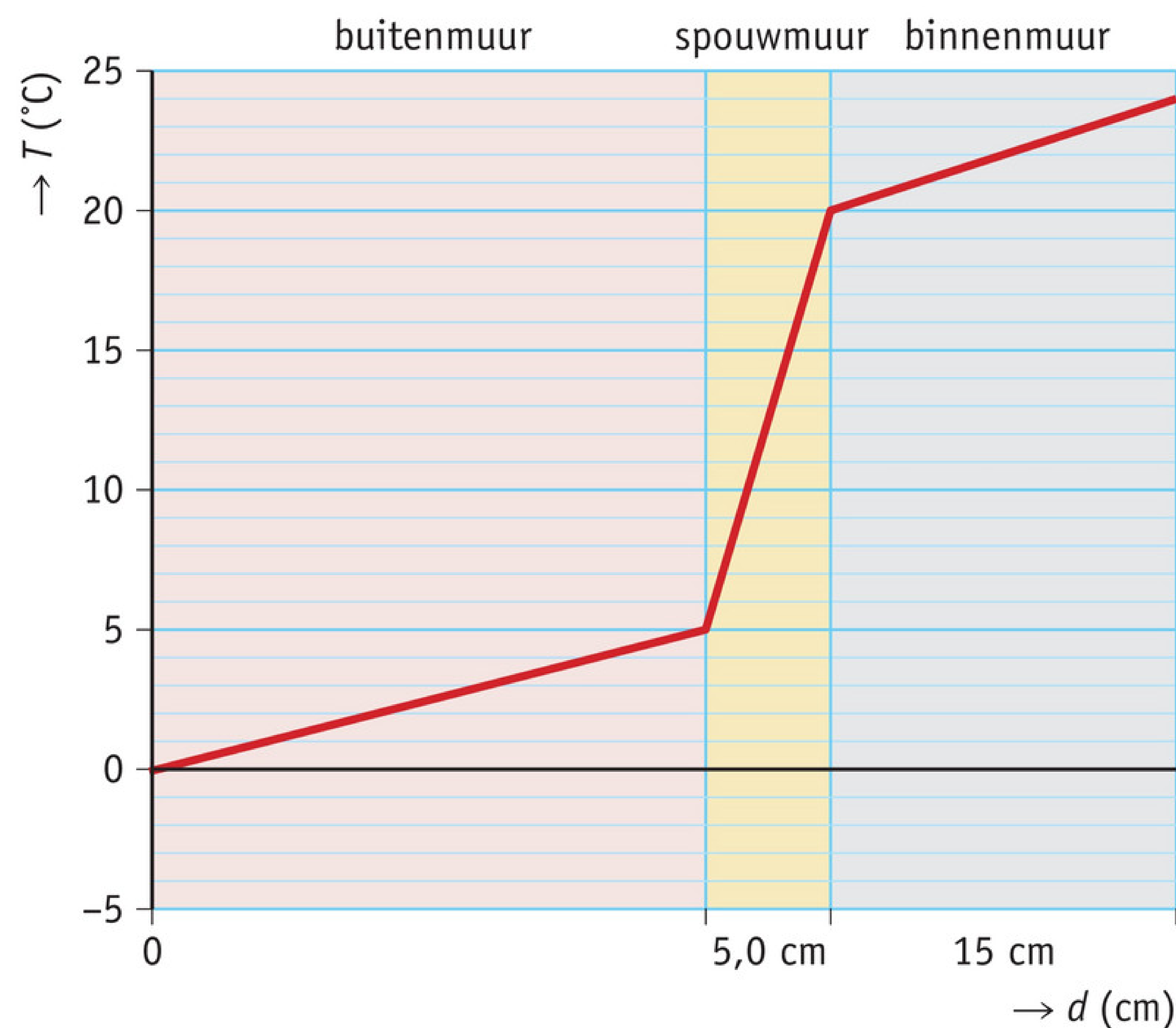
De spouwmuur kan ook gevuld worden met isolatiemateriaal. In figuur 20 is het verloop van de temperatuur weergegeven als functie van de dikte van een muur. De binnen- en buitenmuur zijn van baksteen ($\lambda$ = 0,50 W $m^{-1}$ $K^{-1}$) en verschillen in dikte.

**c** Toon aan dat de warmtestroom door een oppervlak van 1,0 $m^2$ binnenmuur 13 W is.

**d** Leg uit dat voor de warmtestroom die naar buiten weglekt, geldt:
$P_{\text{binnenmuur}} = P_{\text{spouwmuur}} = P_{\text{buitenmuur}}$

**e** Bepaal met behulp van figuur 20 de warmtegeleidingscoëfficiënt van het isolatiemateriaal in de spouwmuur.

**f** Bepaal met behulp van figuur 20 de dikte van de buitenmuur.




▲ **figuur 20** de (*T*,*d*)-grafiek van een muur

**39** Warmtegeleiding en elektrische geleiding

In figuur 16 is het verband weergegeven tussen de elektrische geleiding en de warmtegeleiding, waarbij geldt: *elektrische geleiding* = *constante* × *warmtegeleiding*.

**a** Toon met behulp van het afleiden van eenheden aan dat de elektrische geleiding (S $m^{-1}$) gelijk is aan het 'omgekeerde' van de soortelijke weerstand.

**b** Leid uit de formule voor de warmtestroom de eenheid van de warmtegeleidingscoëfficiënt af.

**c** Geef de reden waarom de lijn in figuur 16 door de oorsprong moet gaan.

**d** Bepaal de grootte en de eenheid van de constante.

**+40** Ketel verwarmen

Een ketel met water wordt op een gasfornuis gezet. De bodem van de ketel is van staal gemaakt en 4,0 mm dik. De oppervlakte van de bodem is 600 $cm^2$ groot. De gasvlam heeft een vermogen van 400 W. Het water kookt. Veronderstel dat alle warmte wordt afgestaan aan de bodem van de ketel.

**a** Bereken de temperatuur van de onderkant van de ketel.

**b** Het handvat van de ketel is niet gemaakt van staal, maar van een thermoharder. Leg deze keuze uit met behulp van Binas tabel 10B.

# 5 Bijzondere materialen

In deze paragraaf leer je:
- wat composieten zijn;
- waar biomaterialen worden toegepast;
- toepassingen kennen van nanomaterialen.

Er zijn tegenwoordig materialen met eigenschappen waar men vroeger van droomde. Sommige materialen zijn ontstaan door de ontwikkelingen in de ruimtevaart, andere materialen zijn het resultaat van uitgebreid onderzoek in hightechlaboratoria en sommige materialen zijn door puur toeval ontstaan. Voor elke toepassing moet een materiaal worden gekozen of ontwikkeld dat het best aan de gestelde eisen voldoet.

## Composieten

Composieten zijn materialen die zijn opgebouwd uit verschillende componenten. Traditionele ‘composieten’ ken je waarschijnlijk wel: triplex, multiplex en gewapend beton. Nieuwe composieten bestaan meestal uit kunststofmengsels waaraan vezels zijn toegevoegd. Die vezels zijn van glas, koolstof of van een andere zeer sterke kunststof: aramide.
Composieten worden in veel producten toegepast waaraan hoge sterkte-eisen worden gesteld. Bijvoorbeeld de rompen en vleugels van vliegtuigen en de carrosserie van formule 1-auto’s (figuur 21).

Sommige composieten zijn zeer slijtvast waardoor ze in remvoeringen kunnen worden toegepast. Vroeger werd daarvoor het schadelijke asbest gebruikt. Ook tandartsen gebruiken tegenwoordig een snel hardende composiet van kunststof en glasvezel als vulling.




▲ **figuur 21** In deze formule 1-auto zijn composieten verwerkt.

## Biomaterialen

De kwaliteit van leven wordt voor een groot deel bepaald door het gemak waarmee je kunt bewegen. Als door slijtage of door een ongeval botten of zelfs hele gewrichten niet meer goed functioneren, kunnen ze worden vervangen door kunstbotten of kunstgewrichten, zogenoemde **prothesen** (figuur 22). Die moeten worden gemaakt van materialen die sterk zijn en niet door lichaamsvloeistoffen worden afgestoten. Daarvoor worden combinaties van materialen gekozen, bijvoorbeeld vitallium, een legering van kobalt, chroom en molybdeen. Hiervan wordt kunstbot gemaakt dat, op de plaatsen waar moet worden gedraaid (de gewrichten), wordt bekleed met nylon.



▲ **figuur 22** röntgenopname van een knieprothese

Tegenwoordig is men op zoek naar nieuwe biomaterialen die meer kunnen. Bijvoorbeeld het menselijk lichaam activeren om zelf een belangrijke bijdrage te leveren aan het herstelproces.

### Kristallen

Als atomen regelmatig gerangschikt zijn in een rooster, wordt dat een **kristalrooster** genoemd. Een brokje van dat materiaal heet een kristal. Bepaalde kristallen kunnen onder invloed van druk een elektrische spanning produceren. Maar het werkt ook omgekeerd: ze kunnen vervormen als er spanning over wordt aangelegd. Dit zijn de zogenoemde **piëzokristallen**. Ze worden toegepast in microfoons en in de ontsteking van een gasfornuis. Ze behoren tot een groep stoffen die ook wel *smart materials* worden genoemd.
Zeer bijzonder zijn kristallen van zachte materialen: de *liquid crystals* (LC). Deze hebben eigenschappen van zowel een vast kristal als van een vloeistof. Ze worden onder andere toegepast in lcd-schermen in televisies en computers.

### Nanomaterialen

Een relatief nieuwe technologie is de nanotechnologie. Door gebruik te maken van laagjes die niet dikker zijn dan een paar atomen, enige tientallen nanometers (nm) dik, kunnen producten worden ontwikkeld met bijzondere materiaaleigenschappen.
De ontwikkeling van nanotechnologie gaat razendsnel. Inmiddels wordt deze technologie al in veel producten toegepast. Van zonnebrandolie met een uv-filter van nanodeeltjes tot organische zonnecellen, van brillen met een krasvaste laag tot duurzamere medische implantaten, maar ook ter bestrijding van zweetvoeten in sokken. De mogelijkheden lijken onbegrensd. Nanomaterialen zijn ongetwijfeld de materialen van de toekomst, ook al zijn er wetenschappers die vooral waarschuwen voor de mogelijke gevaren van nanomaterialen. De ultrakleine nanodeeltjes zouden zich bijvoorbeeld een weg kunnen banen door je huid en zelfs door celwanden en op die manier overal in je lichaam terecht kunnen komen.

**Onthoud!**

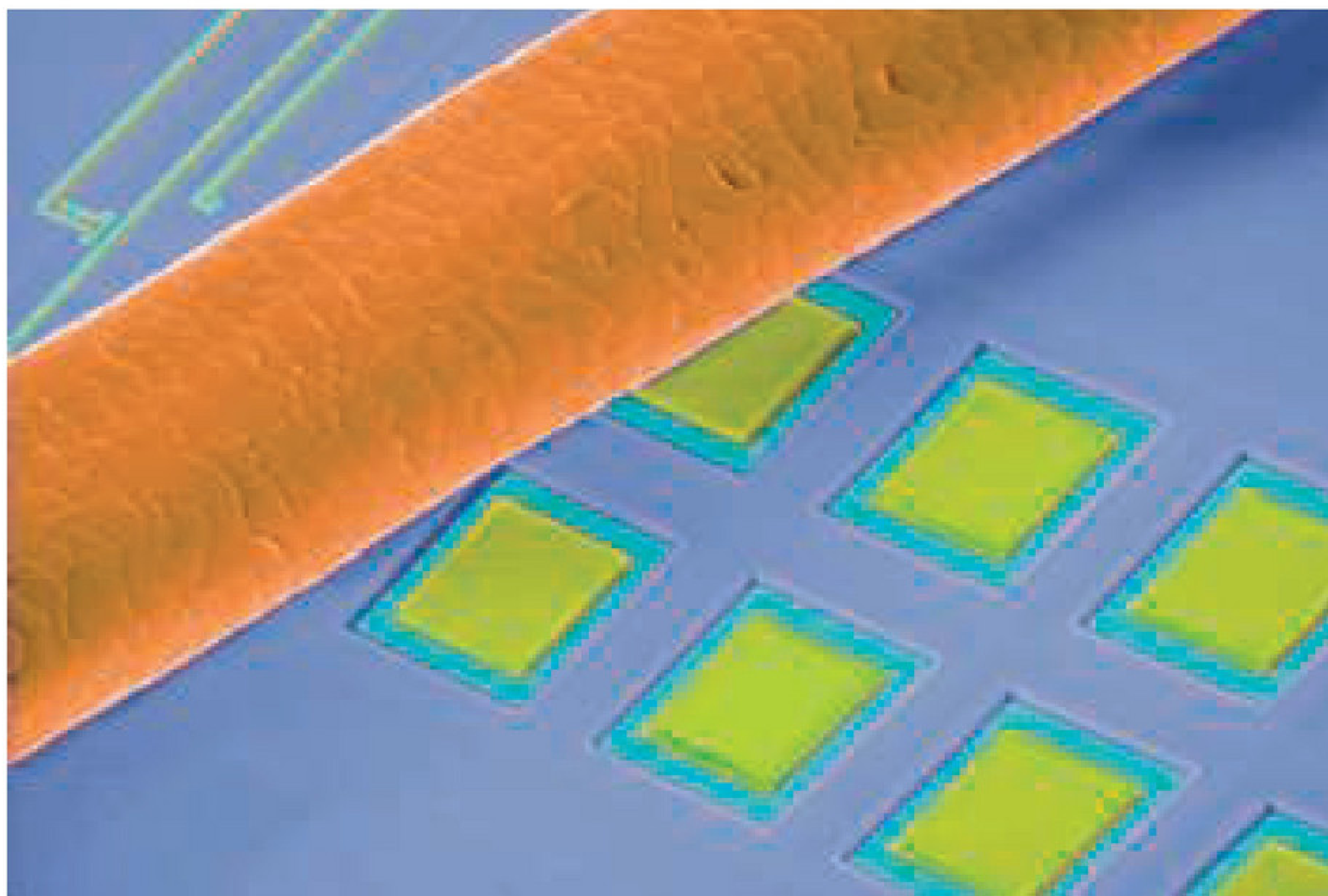
- Composieten zijn mengsels van materialen, waaraan vezels zijn toegevoegd om het materiaal speciale eigenschappen te geven.
- Biomaterialen zijn combinaties van materialen en worden toegepast in prothesen.
- Bepaalde kristallen hebben bijzondere eigenschappen, zoals piëzo-elektriciteit, of ze komen voor in een toestand die je van kristallen niet verwacht: ze zijn vloeibaar.
- Bij nanomaterialen wordt gebruikgemaakt van de bijzondere eigenschappen van laagjes atomen van slechts enkele tientallen nanometers dik.

## Opdrachten

**41** Bijzondere materialen
Beantwoord de volgende vragen.
- **a** Leg uit wat composieten zijn.
- **b** Waarvoor worden biomaterialen gebruikt?
- **c** Wat zijn nanomaterialen?

**42** Nanomateriaal
De dikte van het nanomateriaal koolstof in plakband is 10 nm.
- **a** Bereken de dikte van dit nanomateriaal in millimeter.
- **b** Bereken het volume van het nanomateriaal in kubieke meter, als het hele oppervlak van de aarde met dit nanomateriaal zou zijn bedekt. Ga ervan uit dat de aarde een regelmatige bol is.

**43** Dikte van een nanochip
In figuur 23 zie je enkele nanochips onder een mensenhaar.
Maak een schatting van de grootte van een nanochip.



▲ **figuur 23** nanochips onder een mensenhaar

**44** Mdf
Geperste platen van fijngemalen houtvezels met kunstharslijm kun je ook een composiet noemen. Deze composiet wordt mdf (*medium density fibreboard*) genoemd. Mdf-platen worden in de meubelindustrie gebruikt en ook toegepast in aanrechtbladen. Mdf heeft ten opzichte van natuurlijk hout een aantal voordelen. Het zal bijvoorbeeld nauwelijks ‘werken’ (voortdurend uitzetten en krimpen waardoor het kan scheuren) en het is eenvoudig te bewerken. Mdf heeft ook nadelen: het is bijvoorbeeld nogal poreus waardoor (schadelijke) gassen van de kunstharsen vrijkomen. Ook worden beitels waarmee de platen worden bewerkt snel bot.
- **a** Welke factoren kunnen het ‘werken’ van hout veroorzaken?
- **b** Waarom wordt aanbevolen mdf-platen af te lakken?
- **c** Leg uit waarom beitels bij het bewerken van mdf sneller slijten dan bij natuurlijk hout.

**45** Glare
Het eerste vliegtuig waarin het composietmateriaal glare werd toegepast, was de Airbus A380, in 2017 het grootste passagiersvliegtuig ter wereld.
**a** Metaalmoeheid is het verschijnsel waarbij in metaal dat voortdurend wordt belast door trek- en drukkrachten, scheurtjes ontstaan die de sterkte van het materiaal aantasten. Leg uit waarom composietmaterialen beter zijn bestand tegen materiaalmoeheid dan het vroeger veelgebruikte aluminium.
**b** Leg uit in welke delen van het vliegtuig glare wordt toegepast.

**46** Natriumchloride
Natriumchloride (NaCl) is de scheikundige naam voor keukenzout. NaCl bestaat uit Na-atomen en Cl-atomen die in een kristalrooster zijn gerangschikt. In deze opdracht bekijk je een kubusvormig blokje NaCl met ribben van 1,00 cm.
**a** Bereken de massa van dit kubusvormige blokje NaCl.
**b** Zoek in Binas de atoommassa's op van Na en Cl en druk deze uit in kilogram.
**c** Bereken het aantal NaCl-moleculen in dit kubusvormige blokje.

## Eindopdracht

**47** Composietmateriaal
Voor het berekenen van de treksterkte van composietmateriaal wordt de volgende formule gebruikt:

$$\sigma_c = v_v \cdot \sigma_v + v_k \cdot \sigma_k$$

Hierin is:
- $\sigma_c$ de treksterkte van de composiet in newton per vierkante meter (N m$^{-2}$);
- $v_v$ de vezelfractie;
- $\sigma_v$ de treksterkte van de vezel in newton per vierkante meter (N m$^{-2}$);
- $v_k$ de kunststoffractie;
- $\sigma_k$ de treksterkte van de kunststof in newton per vierkante meter (N m$^{-2}$).

In figuur 24 vind je enkele stofeigenschappen van een staafje dat is gemaakt van het composietmateriaal glas en kunststof.

lengte composietstaafje = 400,0 mm
doorsnede composietstaafje = 20 mm$^2$
dichtheid composiet = $1{,}80 \cdot 10^3$ kg m$^{-3}$

$\lambda = 0{,}45$ W m$^{-1}$ K$^{-1}$

treksterkte glasvezel = $3{,}0 \cdot 10^9$ N m$^{-2}$
elasticiteitsmodulus glasvezel = $75 \cdot 10^9$ N m$^{-2}$
volumefractie glasvezel = 40%

treksterkte kunststof = $1{,}0 \cdot 10^9$ N m$^{-2}$
elasticiteitsmodulus kunststof = $4{,}5 \cdot 10^9$ N m$^{-2}$
volumefractie kunststof = 60%

▲ **figuur 24** stofeigenschappen van het composietmateriaal

**a** Bereken de treksterkte van het composietmateriaal.

Voor het berekenen van de elasticiteitsmodulus van composietmateriaal wordt de volgende formule gebruikt:

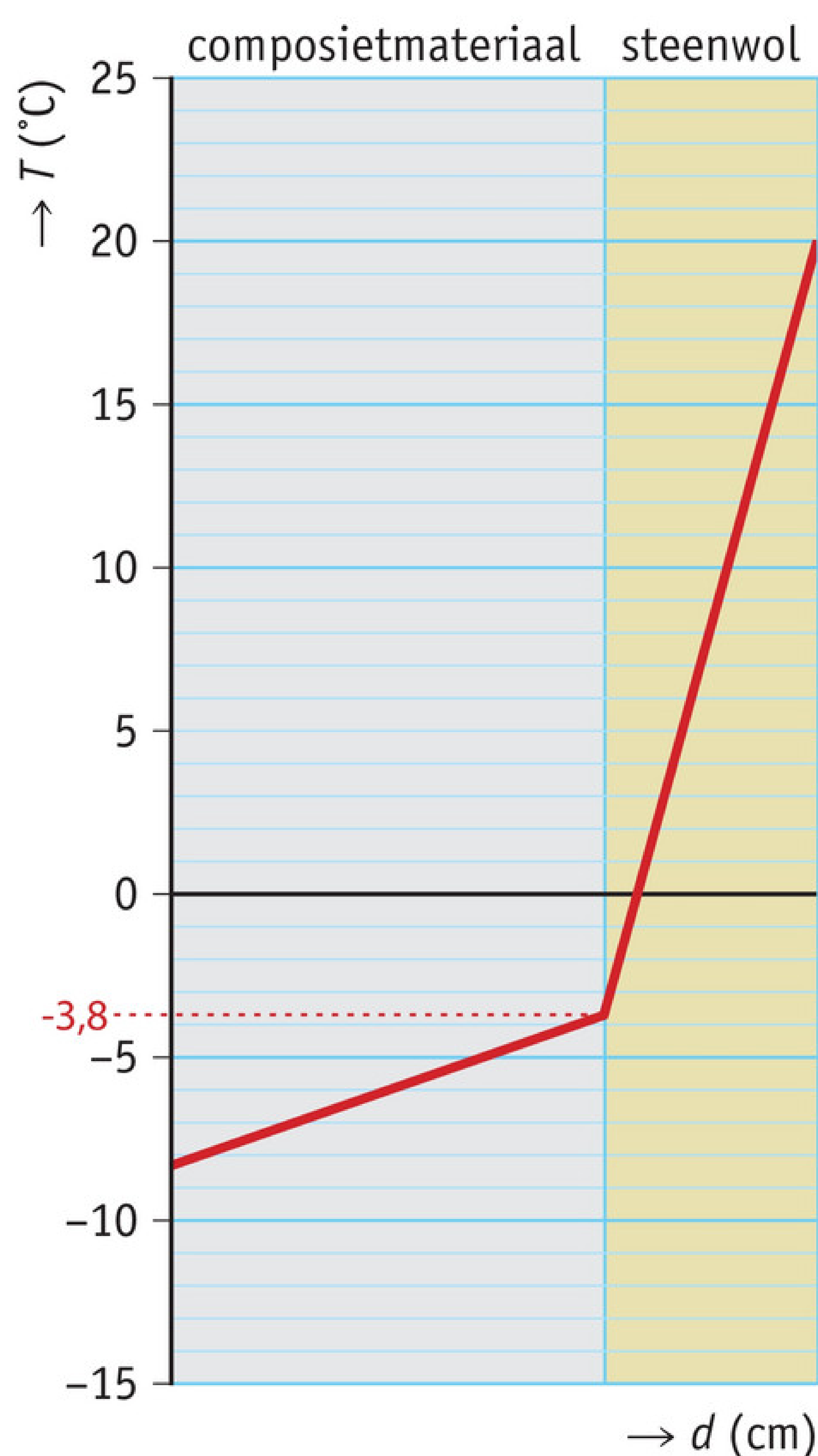
$$E_c = v_v \cdot E_v + v_k \cdot E_k$$

Hierin is:
- $E_c$ de elasticiteitsmodulus van de composiet in newton per vierkante meter (N $m^{-2}$);
- $v_v$ de vezelfractie;
- $E_v$ de elasticiteitsmodulus van de vezel in newton per vierkante meter (N $m^{-2}$);
- $v_k$ de kunststoffractie;
- $E_k$ de elasticiteitsmodulus van de kunststof in newton per vierkante meter (N $m^{-2}$).

**b** Bereken de elasticiteitsmodulus van het composietmateriaal.
**c** Bereken de maximale kracht waarmee het staafje kan worden belast.
**d** Bereken de lengte van het staafje bij maximale belasting.
**e** Leg uit of, en zo ja in welke mate, de treksterkte en rek veranderen als:
- het staafje 2× zo lang is
- het staafje 2× zo dik is.

Het composietmateriaal wordt ook gebruikt voor dakkapellen in de vorm van platen. Deze platen zijn elk 4,0 cm dik, 3,0 m lang en 1,0 m breed.
**f** Bereken de massa van een plaat.
**g** Bereken de warmtestroom die door één plaat wordt getransporteerd als het temperatuurverschil over beide zijden van de plaat 28 °C is.

De plaat wordt geïsoleerd met 2,0 cm dik steenwol ($\lambda$ = 0,040 W $m^{-1}$ $K^{-1}$). In figuur 25 is het verloop van de temperatuur weergegeven als functie van de dikte van beide materialen.




▲ **figuur 25** de (*T*,*d*)-grafiek

**h** Geef aan of de volgende uitspraken waar of niet waar zijn.
1 De warmtestroom door beide materialen is even groot.
2 Steenwol isoleert beter dan het composietmateriaal.

**Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).**

# 6 Practicum

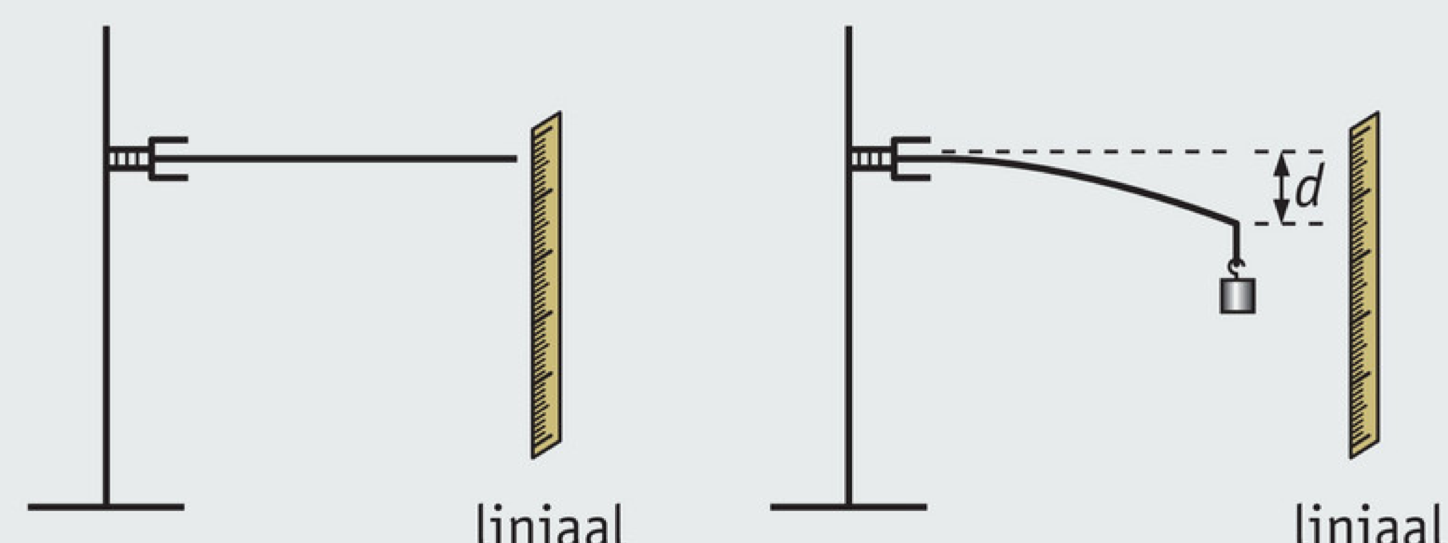
## EXPERIMENT 1 Vervorming van een zaagblad (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Als je gewichtjes aan een zaagblad hangt, buigt het blad door. Dit is een voorbeeld van vervorming. Als een voorwerp, nadat de kracht erop is uitgeoefend, weer in de beginstand terugkeert, spreek je van elastische vervorming. Bestaat er een recht evenredig verband tussen de uitgeoefende kracht en de grootte van de vervorming, dan voldoet deze vervorming aan de wet van Hooke.

**Onderzoeksvraag**
Geldt de wet van Hooke voor een zaagblad dat wordt belast?

**Benodigdheden**
zaagblad; statiefmateriaal; gewichtjes; liniaal (als je geen zaagblad hebt, kun je ook een metalen liniaal gebruiken en die belasten)

**Uitvoering**
- Bevestig het zaagblad horizontaal met een klem.
- Stel verticaal een liniaal op aan het uiteinde van het zaagblad, zodat je de doorbuiging *d* van het zaagblad kunt meten (figuur 33).
- Maak een tabel en zet daarin de massa *m*, de door deze massa's uitgeoefende kracht *F* en de doorbuiging *d*.
- Hang verschillende massa's aan het zaagblad en meet steeds de doorbuiging *d*. Vul de resultaten in je tabel in. Kies geschikte massa's.




▲ **figuur 33** opstelling om de doorbuiging van een zaagblad te meten

**Verwerking**

1 Maak een grafiek waarin je de doorbuiging *d* uitzet tegen de uitgeoefende kracht *F*.

2 Bereken voor al je metingen het quotiënt

$$\frac{\text{kracht}}{\text{doorbuiging}} = \frac{F}{d}$$

3 Bereken de 'veerconstante' van het zaagblad.

**Conclusie**
4 Beantwoord de onderzoeksvraag.

## EXPERIMENT 2 De soortelijke warmte van een metalen blokje (begripspracticum)

**Inleiding**
Als je een koud blokje in een warme vloeistof onderdompelt, stijgt de temperatuur van het blokje. De vloeistof staat warmte af, die het blokje opneemt. De vloeistof daalt dus in temperatuur. Dit proces van warmteoverdracht stopt als het blokje en de vloeistof dezelfde temperatuur hebben bereikt.

**Onderzoeksvraag**
Hoe groot is de soortelijke warmte van een metalen blokje?

**Benodigdheden**
bekerglas; metalen blokje van een bekend materiaal; thermometer; maatcilinder; water

**Uitvoering**
- Meet de temperatuur in het lokaal. Je mag ervan uitgaan dat het metalen blokje deze temperatuur heeft.
- Om te voorkomen dat er veel warmte naar de omgeving gaat, voer je het experiment uit in een joulemeter, een geïsoleerde pot. Vul deze joulemeter met 200 mL heet water. Meet de temperatuur van het water.
- Laat het metalen blokje voorzichtig in het hete water in de joulemeter glijden. Doe het deksel op de joulemeter. Wacht ongeveer een minuut.
- Meet opnieuw de temperatuur van het water in de joulemeter.

**Verwerking**

1 Bepaal de temperatuurdaling van het water.
2 Bereken de warmte die het water heeft afgestaan.
3 Hoeveel warmte heeft het blokje opgenomen? Ga ervan uit dat de joulemeter met inhoud geen warmte heeft afgestaan aan de omgeving.
4 Bepaal de temperatuurstijging van het metalen blokje.
5 Beantwoord de onderzoeksvraag en bereken daarmee de soortelijke warmte van het metaal waarvan het blokje is gemaakt.
6 Zoek in Binas de soortelijke warmte van het metaal op.
7 Vergelijk de soortelijke warmte die je uit je metingen hebt berekend, met de waarde uit Binas. Komen ze met elkaar overeen? Zo nee, leg uit waarom deze waarden niet even groot zijn.

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

## EXPERIMENT 3 Waarom een schip blijft drijven (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Een groot vrachtschip is gemaakt van staal en vervoert een zware vracht. Toch blijft het vrachtschip drijven. In dit experiment ga je onderzoeken hoe dit komt. Hierbij maak je gebruik van verschillende kunststof bakjes (het schip) en gewichtjes (de vracht). Dit is een vereenvoudiging van de werkelijkheid, maar de conclusies die je trekt zijn ook van toepassing op het echte schip.

**Onderzoeksvraag**
Een kunststof bakje blijft drijven als de toegevoegde massa niet te groot is. Welke factoren bepalen de massa die maximaal toegevoegd kan worden?

## EXPERIMENT 4 Doorbuiging van spaghetti (begripspracticum)

**Inleiding**
Het doorbuigen van een streng spaghetti kun je vergelijken met het doorbuigen van een plank. Totdat de streng of de plank breekt door een te grote kracht die wordt uitgeoefend, is de vervorming elastisch.

**Onderzoeksvraag**
Voldoet de doorbuiging van spaghetti aan de wet van Hooke?

## EXPERIMENT 5 Bepaling van de stookwaarde van waxine (begripspracticum)

**Inleiding**
De hoeveelheid warmte die vrijkomt bij verbranding van een stof, hangt af van de soort brandstof, de hoeveelheid brandstof en de tijdsduur van het verbrandingsproces. De invloed van de soort brandstof wordt uitgedrukt in de stookwaarde. De stookwaarde geeft aan hoeveel warmte er bij verbranding van één kilogram (bij vaste stoffen) of één kubieke meter (bij vloeistoffen en gassen) vrijkomt.

**Onderzoeksvraag**
Hoe groot is de stookwaarde van waxine?

## EXPERIMENT 6 De temperatuur van een gloeiende spijker (apparatuur-demoproef)

**Inleiding**
Warmte stroomt van een plaats met hoge temperatuur naar een plaats met een lagere temperatuur. Als je een gloeiende spijker in koud water onderdompelt, stroomt er zolang warmte van de spijker naar het water tot de temperatuur van spijker en water aan elkaar gelijk zijn.

**Onderzoeksvraag**
Hoe bepaal je met behulp van een joulemeter met een geringe hoeveelheid water de temperatuur van een gloeiende spijker?

## ONDERZOEK Rekken en breken

**Inleiding**
Als je kracht uitoefent op een koperen draad, rekt deze draad uit. Als de kracht te groot wordt, breekt de draad.

**Onderzoeksvragen**
**1** Hoe hangt de rek van een koperen draad af van de kracht?
**2** Hoe groot is de treksterkte van de koperen draad?

**Praktisch**
Bevestig de draad aan het plafond. Hang een lege emmer aan de draad. Door steeds meer stenen in de emmer te leggen, kun je de kracht variëren die op de metaaldraad wordt uitgeoefend. Voer de benodigde metingen uit. Maak een grafiek waarin je de rek uitzet tegen de uitgeoefende kracht.

**Conclusie**
Beantwoord de onderzoeksvragen.



HOOFDSTUK 5

# Arbeid en energie

De belangrijkste wet in de natuurkunde is ongetwijfeld de wet van behoud van energie. Deze wet is nog nooit bewezen, maar er is geen enkele natuurkundige die eraan twijfelt. In dit hoofdstuk leer je, behalve de wet van behoud van energie, nog een belangrijke wet over energie en arbeid. Arbeid heeft te maken met kracht en verplaatsing. Je kunt alleen arbeid verrichten als er voldoende energie is.

## Introductie



## Praktijk



## Theorie



## Maatschappij

# Wat weet je al over arbeid en energie?

Leerdoelen
1 Je kunt rekenen aan hoeveelheden elektrische energie.
2 Je kunt uitleggen hoe energieomzettingen werken.
3 Je kunt werken met de Eerste wet van Newton.
4 Je kunt berekeningen maken met de Tweede wet van Newton.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen over arbeid en energie geleerd.
Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

## Opdrachten voorkennis

**1** Een bepaald type windmolen levert gemiddeld een vermogen van 200 kW.
Hoeveel van deze windmolens zijn nodig om een centrale van 800 MW te vervangen?
- ☐ 160
- ☐ 250
- ☐ 400
- ☐ 4000

**2** Kies de juiste woorden.
In een brandende kaars vindt energieomzetting voornamelijk plaats van *chemische energie* / *stralingsenergie* / *warmte* naar *chemische energie* / *stralingsenergie* / *warmte*.
In een dynamo vindt energieomzetting voornamelijk plaats van *bewegingsenergie* / *elektrische energie* naar *bewegingsenergie* / *elektrische energie* / *licht*.

**3** Je ziet een wielrenner versnellen voor de eindsprint. De voortstuwende kracht op de wielrenner is tijdens de eindsprint constant.
Wat gebeurt er als de wielrenner tijdens de sprint nog meer voorovergebogen gaat zitten (dus zijn frontale oppervlakte nog kleiner maakt)?
De luchtweerstandskracht wordt *grote* / *kleiner* en de resulterende kracht wordt *groter* / *kleiner*.



▲ **afbeelding 1**

**4** Tijdens de lancering van een raket is de versnelling op een gegeven moment gelijk aan 20 $m/s^2$. De massa van de raket is $3{,}0 \cdot 10^6$ kg.
Hoe groot is de resulterende kracht die op de raket werkt?
De resulterende kracht is gelijk aan ________ MN.

**5** Op een auto werkt een resulterende kracht van 2,1 kN. De massa van de auto is 700 kg.
Bereken de versnelling van de auto.
De versnelling van de auto is ________ $m/s^2$.

**6** Een skiër versnelt in 10 s van 0 km/h naar 126 km/h. De massa van de skiër is 80 kg.
Bereken de grootte van de resulterende kracht op de skiër.
De resulterende kracht is gelijk aan ________ N.

 Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

**Praktijk**

# De kracht van water

Er wordt op aarde steeds meer energie verbruikt. Meer dan 90% van deze energie is momenteel nog afkomstig van fossiele brandstoffen. Deze brandstoffen veroorzaken lucht- en watervervuiling; bij de verbranding ervan komt onder andere het broeikasgas $CO_2$ vrij. Bovendien raken deze brandstoffen op. Daarom wordt er steeds meer duurzame energie gebruikt. In Nederland wordt dan al snel aan zonne-energie, windenergie en aardwarmte gedacht, maar in andere landen wordt bijvoorbeeld gebruikgemaakt van waterkracht.

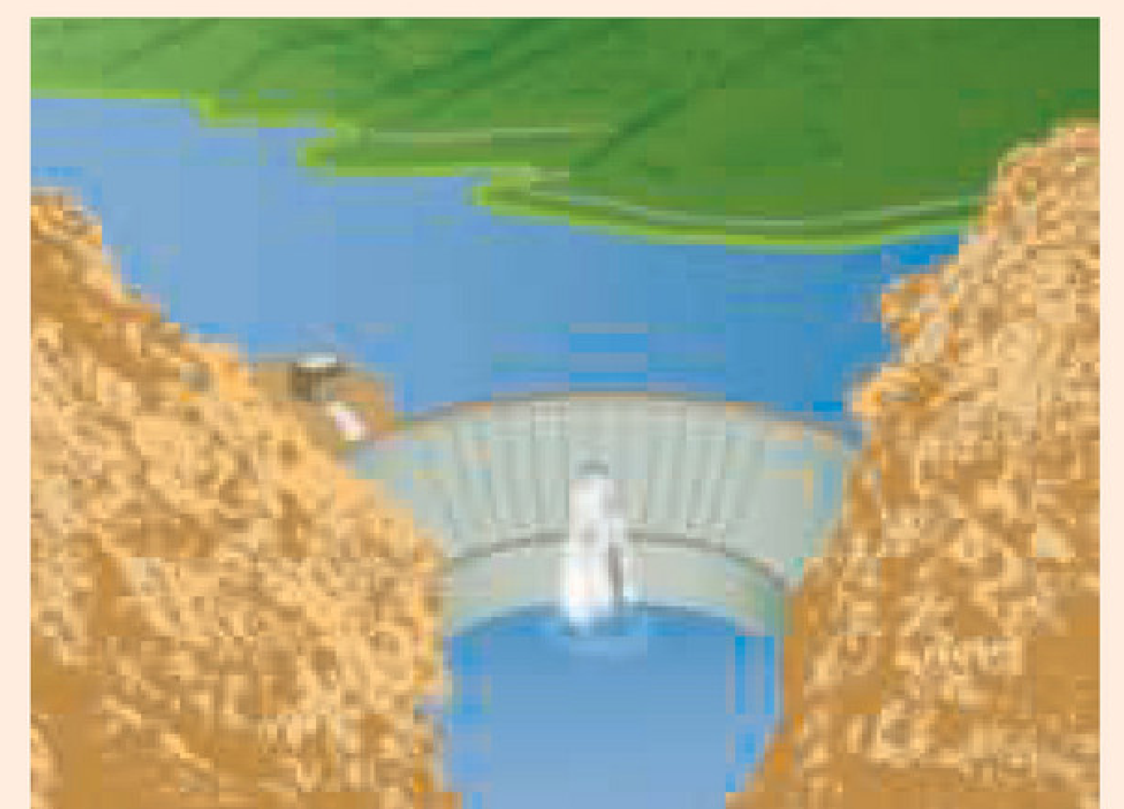


## Stuwdammen

Om waterkracht te benutten, worden stuwdammen gebouwd. Zo'n dam is eigenlijk niets anders dan een barrière in een rivier die verhindert dat het water ongehinderd verder stroomt. Hierdoor hoopt het water zich aan één kant van de dam op en stijgt daar de waterhoogte: er ontstaat een stuwmeer. Aan de andere kant van de dam staat het water een stuk lager. Door een opening in de dam stroomt het water van het stuwmeer naar beneden (figuur 1).
Een stuwdam moet de enorme kracht van een gigantische hoeveelheid water kunnen weerstaan en moet daarom erg sterk zijn. Vaak wordt de dam dan ook gebouwd in de vorm van een boog, waarbij het water tegen de bolle kant van de boog staat. Het water dat tegen de boog drukt, maakt de dam alleen maar sterker.

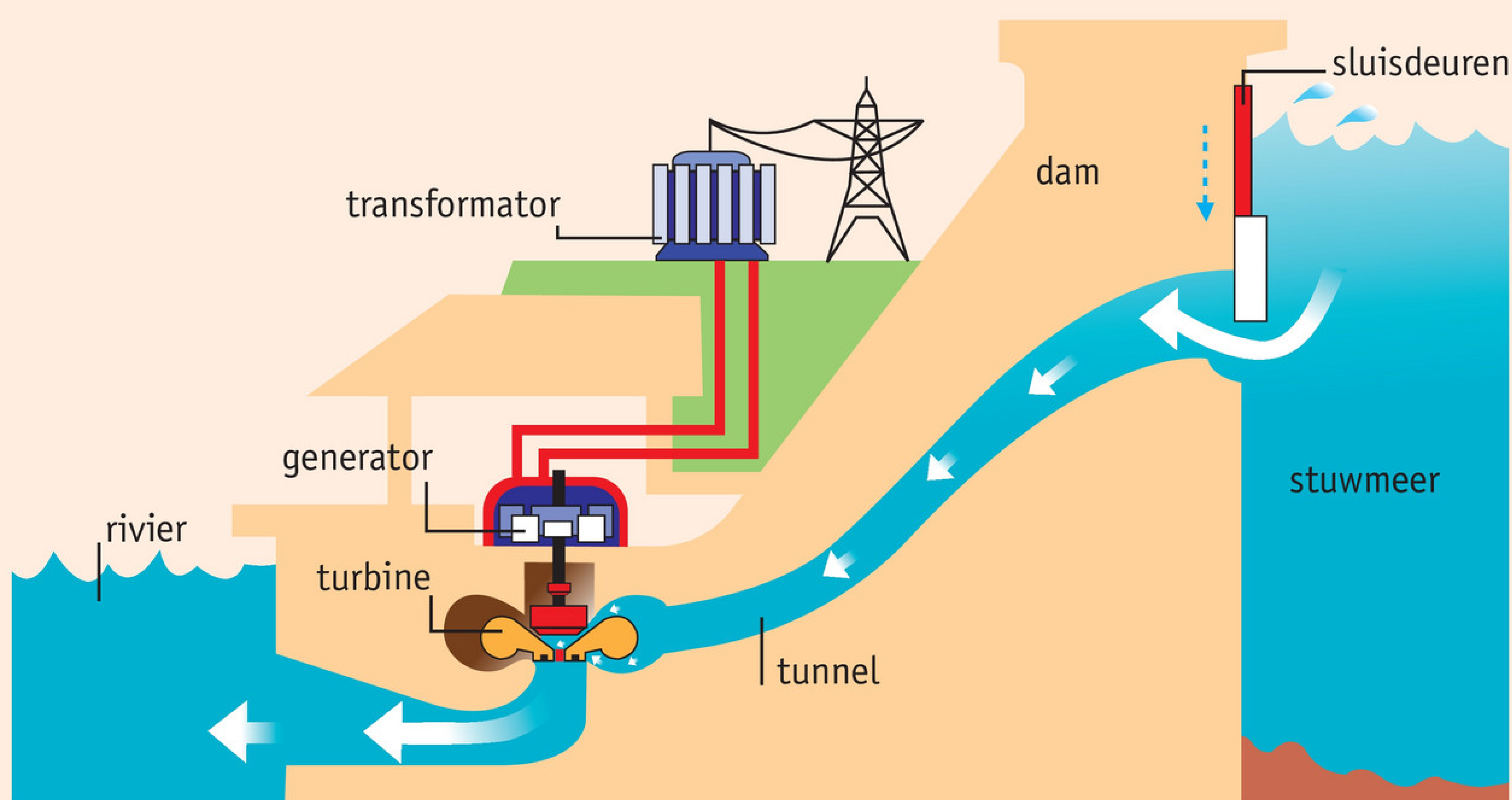
## Hydro-elektriciteit

Het opwekken van elektriciteit met behulp van een stuwdam is eigenlijk heel eenvoudig. Het water staat aan de ene kant van de stuwdam veel hoger dan aan de andere kant. Er loopt een buis met een grote doorsnede door de dam. Hierdoor stroomt het water omlaag van de ene kant naar de andere kant van de dam. Dit stromende water drijft een schoepenrad aan dat op zijn beurt een genera-



▲ **figuur 1** een stuwdam

Hydro-elektriciteit is de schoonste en goedkoopste manier om elektriciteit op te wekken.




▲ **figuur 2** een waterkrachtcentrale

tor, een enorme dynamo, laat draaien. Deze wekt elektriciteit op (figuur 2). Hoe harder het water stroomt, des te meer elektrische energie je ermee kunt opwekken.
Elektriciteit die in een waterkrachtcentrale wordt opgewekt, wordt hydro-elektriciteit genoemd. Het is de schoonste en goedkoopste manier om elektriciteit op te wekken. Maar er zijn ook nadelen. Zo is er altijd een risico op een dambreuk.
In landen met veel bergen en rivieren staan vaak waterkrachtcentrales. Zo wekt Noorwegen 99% van zijn elektrische energie op met waterkracht. Gemiddeld wordt in Europa 11% van de elektrische energie opgewekt met waterkracht.

## De Hooverdam

Op de grens van de Amerikaanse staten Nevada en Arizona ligt een indrukwekkende stuwdam met een grote elektriciteitscentrale. Het is de beroemde Hooverdam (figuur 3), genoemd naar president Herbert Hoover. Hoover stelde in 1921 voor een dam te bouwen in de Colorado

▼ **figuur 3** de Hooverdam



River om overstromingen door deze rivier te voorkomen, om een voorraad water aan te leggen voor de bevolking en de landbouw, en om er elektrische energie mee op te wekken. De bouw begon in 1930 en duurde tot 1936. De Hooverdam is 221,40 m hoog en heeft een dikte van 15 m aan de top van de dam tot 200 m aan de voet van de dam. De dam bestaat uit maar liefst 3,33 miljoen $m^3$ beton. Het stuwmeer achter de dam, Lake Mead, heeft een oppervlakte van 640 $km^2$ en bevat gemiddeld zo'n 35,2 $km^3$ water.
De zeventien generatoren in de dam wekken een vermogen op van 2,1 GW hydro-elektriciteit. Elke turbine heeft een diameter van 5,0 m en een hoogte van 2,0 m. Er stroomt maximaal 100 $m^3$ water per seconde doorheen, waarbij de generator 180 omwentelingen per minuut maakt.

## Waterkracht in Nederland

In Nederland is een heleboel water, maar omdat er geen bergen en dus weinig hoogteverschillen zijn, kan hier geen elektrische energie worden opgewekt met stuwdammen en stuwmeren. Toch wordt in Nederland op kleine schaal in rivieren elektrische energie opgewekt met waterkracht. In de Maas en de Rijn staan stuwen op plaatsen waar het waterpeil te laag dreigt te worden voor scheepvaart. De waterstand is voor de stuw hoger dan achter de stuw. Bij deze stuwen zijn waterkrachtcentrales gebouwd waar het water met een behoorlijke snelheid door grote buizen stroomt. Dit water drijft een generator aan die elektrische energie opwekt. Nederland heeft een aantal van zulke waterkrachtcentrales, onder andere in Alphen/Lith en Maurik (figuur 4). Het opgewekte vermogen is niet erg groot, momenteel maximaal 14 MW.

## Het plan Lievense

De laatste jaren neemt het aantal windmolens in Nederland sterk toe. Met die windmolens wordt elektrische energie opgewekt. Deze energie is echter niet altijd in voldoende mate beschikbaar op tijden dat er behoefte aan is. Soms is er een overmaat aan energie beschikbaar op tijden dat er weinig vraag naar is.
Om dit probleem op te lossen, stelde ingenieur Luc Lievense al in 1979 voor om de windmolens elektrische generatoren te laten aandrijven. De opgewekte elektrische energie kan zo nodig direct worden gebruikt.
De elektrische energie die niet nodig is op dat moment, kan worden benut door pompen, waarmee water in een spaarbekken kan worden gepompt. Zo wordt als het ware de (wind)energie opgeslagen. Deze energie is te gebruiken door het water uit het spaarbekken te laten stromen. Als men gebruik wil maken van deze opgeslagen energie, kan men het water uit het spaarbekken laten wegstromen.
Het zogenoemde plan Lievense bestaat dus uit twee gedeelten:

- een groot aantal windmolens met daaraan gekoppelde elektrische generatoren;
- een spaarbekken waar men óf water in kan laten stromen door middel van elektrisch aangedreven pompen óf water uit kan laten stromen waarbij elektrische energie wordt opgewekt.

Uiteindelijk is het plan nooit uitgevoerd. De investeringskosten waren enorm, maar de belangrijkste reden was de veiligheid. Een dijkdoorbraak van een gevuld Lievense bekken zou een grote waterramp betekenen.
Tegenwoordig zoekt men de oplossing in het importeren en exporteren van windenergie. Zo wordt er bijvoorbeeld een 325 kilometer lange elektriciteitskabel tussen de Groningse Eemshaven en het Deense Endrup aangelegd. De kabel maakt Nederlandse capaciteit beschikbaar voor het Deense elektriciteitsnet en omgekeerd.



▲ **figuur 4** Waterkrachtcentrale

## Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

**1** Waterkracht
Met behulp van waterkracht kan elektriciteit worden opgewekt.

**a** Geef minstens drie voordelen van het gebruik van waterkracht.

**b** Om voldoende elektriciteit op te wekken, zijn grote stuwdammen nodig.
Geef minstens drie nadelen van deze grote stuwdammen (en de bijbehorende enorme stuwmeren).

**2** Stuwdam
In een stuwdam zitten buizen waardoor het water naar beneden stroomt.
Leg uit waarom deze buizen aan de kant van het stuwmeer hoog in de dam zitten en aan de andere kant van de dam juist laag.

**3** Hooverdam
De zeventien generatoren in de Hooverdam wekken een vermogen op van 2074 MW hydro-elektriciteit.
Stel dat de centrale 21% van deze kinetische energie omzet in elektrische energie.
Bereken hoeveel kinetische energie het water dat per seconde door de turbines stroomt dan heeft.

**4** Het plan Lievense
Voor het plan Lievense is een spaarbekken nodig waar water in en uit kan stromen. Het spaarbekken zou kunnen worden gebouwd in het IJsselmeer (figuur 5). In het plan wordt ervan uitgegaan dat het waterniveau in het spaarbekken niet hoger dan 23 m en niet lager dan 17 m boven het waterniveau in het IJsselmeer komt te staan. Het bekken heeft een oppervlakte van 55 $km^2$. Het water wordt uit het IJsselmeer in het spaarbekken gepompt.

Neem bij de volgende vragen aan dat het waterniveau in het IJsselmeer niet verandert.

**a** Bereken de massa van het water dat in het spaarbekken moet worden gepompt om de waterspiegel in het spaarbekken te laten stijgen van 17 m naar 23 m boven het waterniveau in het IJsselmeer.

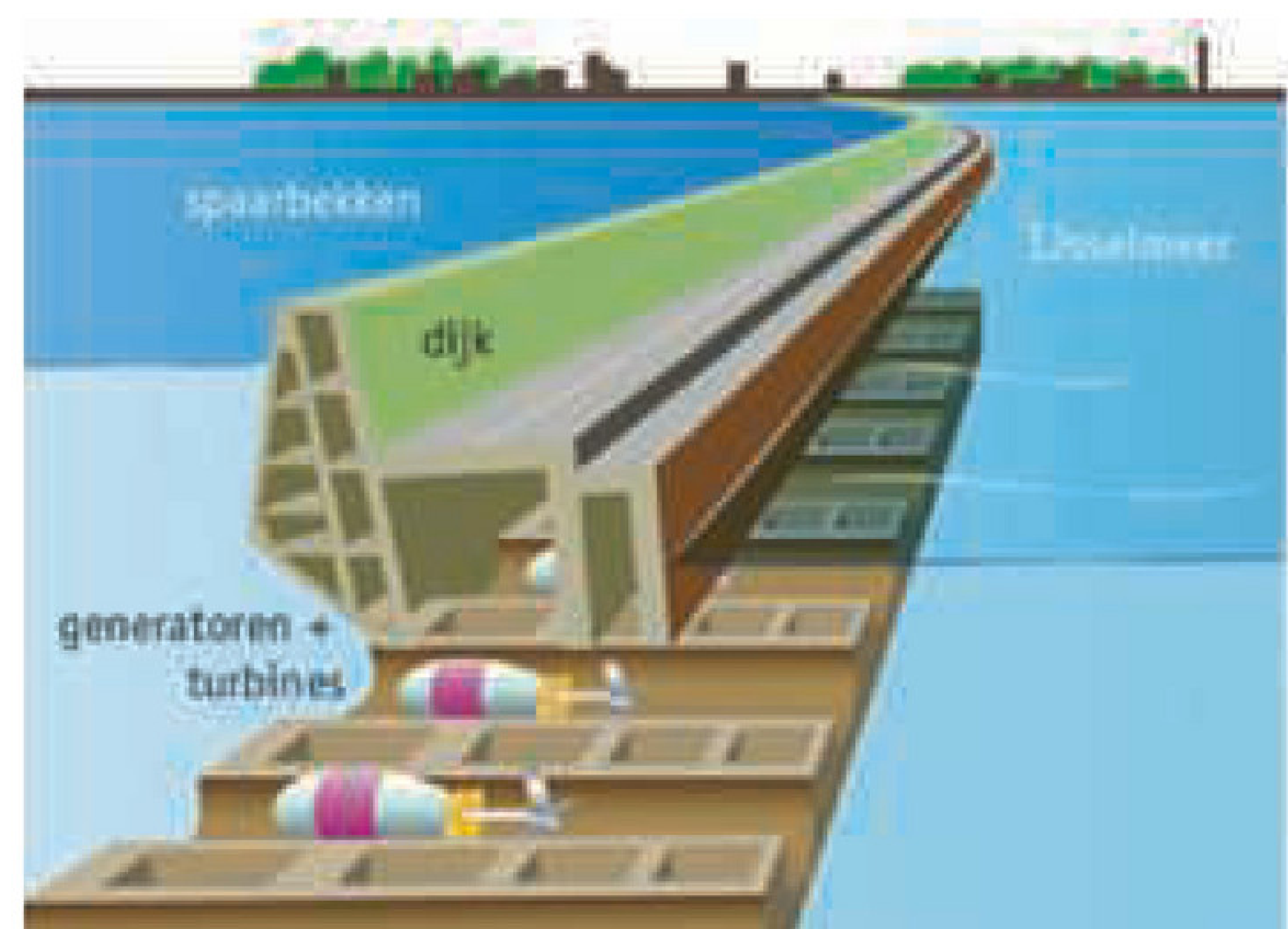
**b** Bereken met hoeveel joule de zwaarte-energie van het water in het spaarbekken toeneemt als de waterspiegel stijgt van 17 m tot 23 m.

**c** Men wil dat het waterniveau in 20 uur van 17 m tot 23 m kan worden opgevoerd.
Bereken hoe groot het vermogen van de gezamenlijke pompen minstens moet zijn.

**d** Om de opgeslagen energie te kunnen gebruiken, laat men water uit het spaarbekken wegstromen door buizen waarin zich het schoepenrad van een waterturbine bevindt. Dit rad gaat daardoor draaien (figuur 6). De waterturbine brengt op haar beurt een generator in beweging, zodat elektrische energie wordt opgewekt.
Veronderstel dat hierbij 7% van de energie verloren gaat. In een stad met 100 000 inwoners wordt gemiddeld een elektrisch vermogen gebruikt van 60 MW.
Bereken hoelang een stad van 100 000 inwoners de benodigde energie uit het spaarbekken kan gebruiken, als het waterniveau in dit spaarbekken daalt van 23 m tot 17 m boven het waterniveau in het IJsselmeer.




▲ **figuur 5** het spaarbekken in het IJsselmeer




▲ **figuur 6** de generatoren en turbines

# 1 Arbeid

In deze paragraaf leer je:
- werken met formules om de arbeid te berekenen;
- weten wanneer een kracht negatieve arbeid verricht;
- het bepalen van de totale arbeid;
- het bepalen van de arbeid van een niet-constante kracht.

Wanneer je een voorwerp verplaatst, oefen je een kracht uit. Je zegt in zo'n geval dat de kracht arbeid heeft verricht. Arbeid is een natuurkundige grootheid die wordt aangegeven met de hoofdletter *W* van het Engelse woord *work*.

## Verrichte arbeid

De verrichte **arbeid *W*** hangt af van de benodigde kracht en de verplaatsing. Als je een pot verf vanaf de grond op een stellage tilt, verricht jouw spierkracht een bepaalde hoeveelheid arbeid. Als je twee van die potten tegelijkertijd op de stellage tilt, verricht jouw spierkracht 2× zo veel arbeid, omdat je 2× zo veel spierkracht nodig hebt. Als de pot verf op een 2× zo hoge stellage wordt getild, is er ten opzichte van de eerste situatie ook 2× zo veel arbeid verricht, omdat de pot over een 2× zo grote afstand (naar een 2× zo grote hoogte) is verplaatst. De verrichte arbeid is recht evenredig met de benodigde kracht *F* en recht evenredig met de verplaatsing *s*. Je rekent de arbeid *W* die een kracht verricht dan ook uit met de formule:

$$W = F \cdot s$$

Hierin is:
- *W* de arbeid die de kracht heeft verricht in newton maal meter; dit noem je newtonmeter (N m);
- *F* de kracht die de arbeid verricht in newton (N);
- *s* de verplaatsing van het voorwerp in meter (m).

De eenheid newtonmeter wordt tegenwoordig meestal joule (J) genoemd, naar de Engelse natuurkundige James Prescott Joule (1818–1889).

***Opmerkingen***
- Je mag deze formule alleen gebruiken als het voorwerp zich verplaatst in de richting van de kracht.
- Vaak wordt voor het gemak gezegd: 'Peter verricht arbeid' in plaats van 'de spierkracht van Peter verricht arbeid'. Maar bedenk dat het altijd een *kracht* is die arbeid verricht.

**Voorbeeldopgave 1**

Marij tilt een doos van 15 kg met een constante snelheid van de grond op een 1,2 m hoge tafel.
Bereken de arbeid die de spierkracht van Marij daarbij verricht.

*Uitwerking*
$m = 15$ kg
$s = 1,2$ m
Als Marij met een constante snelheid tilt, dan geldt $F_{res} = 0$ N en dus is de spierkracht even groot als de zwaartekracht:
$F_{spier} = F_z = m \cdot g = 15 \times 9,81 = 147$ N
$W = F \cdot s = 147 \times 1,2 = 1,8 \cdot 10^2$ N m $= 1,8 \cdot 10^2$ J

Als er een kracht werkt maar deze verplaatst het voorwerp niet, dan verricht de kracht geen arbeid: $W = 0$ J. Dit is bijvoorbeeld het geval als je tegen een zware kast duwt, die niet van zijn plaats komt. Omdat de kast niet wordt verplaatst, heb je geen arbeid verricht.

## Negatieve arbeid

Soms werken krachten tegengesteld aan de richting waarin het voorwerp zich verplaatst. Dit is bijvoorbeeld het geval bij remkrachten, botskrachten en wrijvingskrachten. Zo reed de auto in figuur 1 naar links. Toen de auto de boom raakte, oefende de boom een afremmende kracht uit op de auto naar rechts.




▲ **figuur 1** De botskracht werkte tegengesteld aan de bewegingsrichting van de auto.

Als een kracht tegengesteld aan de bewegingsrichting werkt, is de arbeid negatief. Voor de arbeid verricht door zo'n kracht geldt:

$W = -F \cdot s$

**Voorbeeldopgave 2**

Een tennisbal van 100 g wordt recht omhooggegooid. De bal bereikt een hoogte van 6,5 m. Bereken de arbeid die de zwaartekracht verricht op de bal tijdens de beweging omhoog.

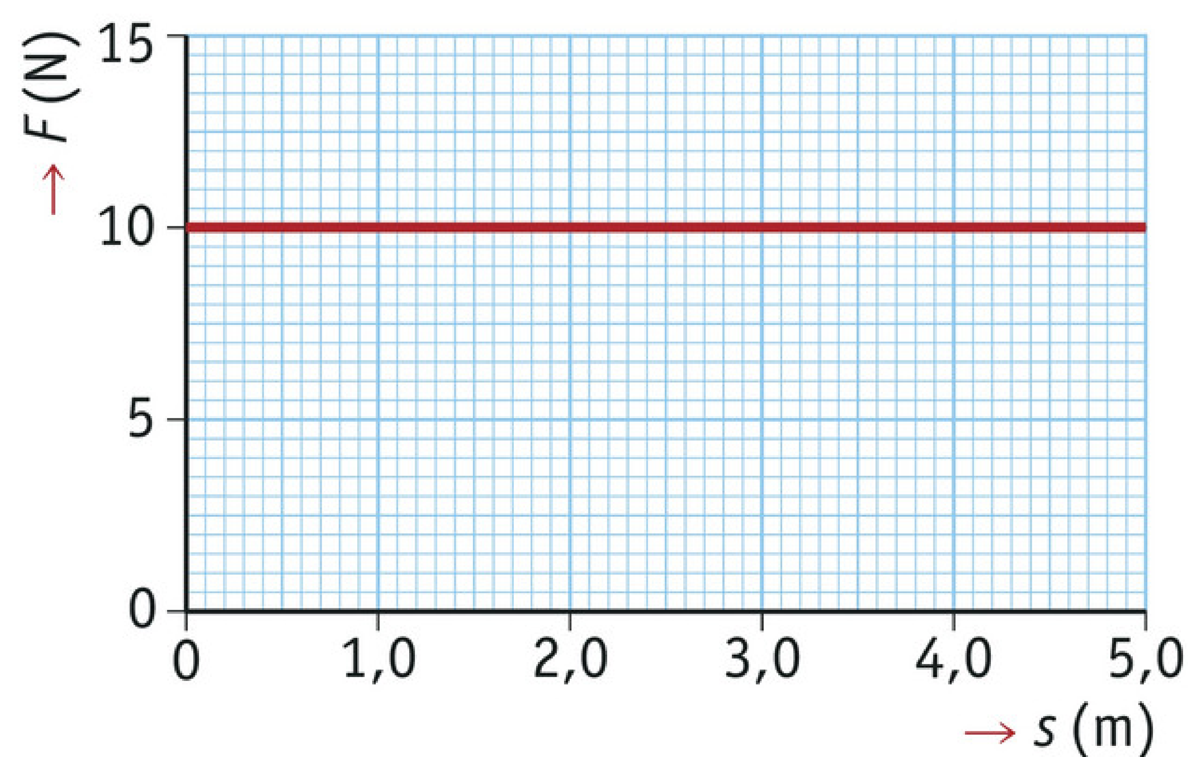
*Uitwerking*
$m = 100$ g $= 0{,}100$ kg
$s = 6{,}5$ m
$F_z = m \cdot g = 0{,}100 \times 9{,}81 = 0{,}981$ N
De zwaartekracht (omlaag) werkt tegengesteld aan de verplaatsing (omhoog), dus de arbeid van de zwaartekracht is negatief:
$W = -F \cdot s = -0{,}981 \times 6{,}5 = -6{,}4$ J

De arbeid die de wrijvingskracht verricht, wordt **wrijvingsarbeid** genoemd. Doordat de wrijvingskracht tegengesteld werkt aan de richting waarin het voorwerp zich verplaatst, is wrijvingsarbeid altijd negatief.

Een kracht die loodrecht op de verplaatsing staat, verricht geen arbeid. Op een auto die over een vlakke weg rijdt, werken behalve de kracht van de motor en de wrijvingskracht, ook de zwaartekracht en de normaalkracht. De arbeid van de motorkracht is positief. De arbeid van de wrijvingskracht is negatief. De arbeid van zowel de zwaartekracht als de normaalkracht is nul, omdat beide krachten loodrecht op de verplaatsing staan.

## De arbeid van een niet-constante kracht

Als een kracht tijdens het verplaatsen van een voorwerp van grootte verandert, kun je de arbeid niet meer uitrekenen met de formule $W = F \cdot s$. Want wat moet je dan voor $F$ invullen? Als je weet hoe groot de gemiddelde kracht is, kun je deze waarde in de formule invullen. In andere gevallen kun je de arbeid die een kracht verricht, bepalen met behulp van een ($F$,$s$)-diagram (figuur 2).



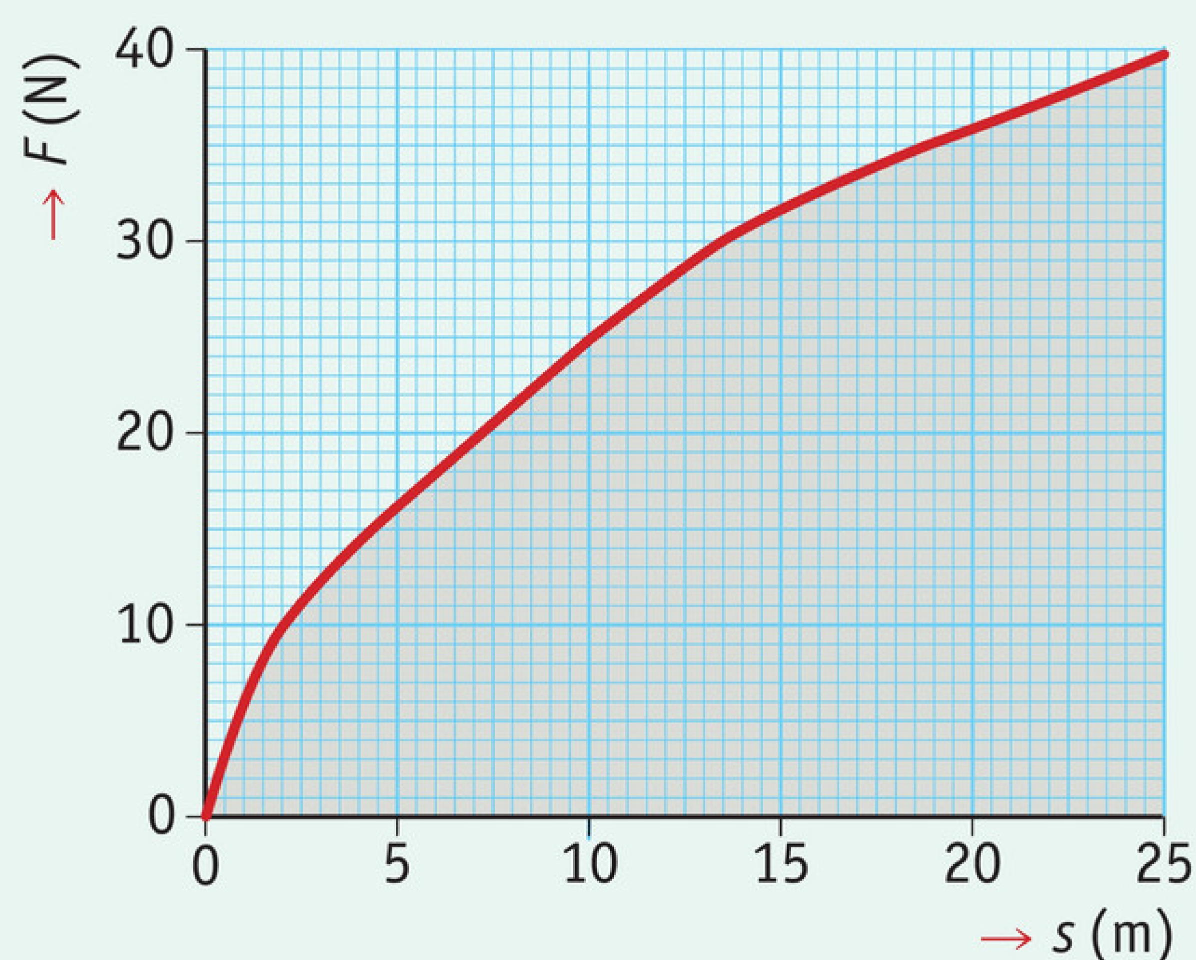

▲ **figuur 2** een ($F$,$s$)-diagram

$F$ is een kracht die een voorwerp verplaatst over afstand $s$. De kracht werkt in de richting van de verplaatsing $s$.
Voor de arbeid die kracht $F$ verricht, geldt: $W = F \cdot s$
$F$ = 10,0 N (de breedte van de rechthoek onder de grafiek)
$s$ = 5,0 m (de lengte van de rechthoek onder de grafiek)
$W = F \cdot s = 10{,}0 \times 5{,}0 = 50$ J

Je kunt zien dat $W$ = lengte · breedte = de oppervlakte van de rechthoek onder de grafiek. De arbeid is dus ook te vinden als de oppervlakte onder de ($F$,$s$)-grafiek. Dit is vooral handig als de grafiek heel onregelmatig is. Dat zie je in voorbeeldopgave 3.

**Voorbeeldopgave 3**

Een kracht verplaatst een voorwerp. Tijdens het verplaatsen varieert de grootte van de kracht. In figuur 3 is het ($F$,$s$)-diagram van deze kracht getekend.




◀ **figuur 3** het ($F$,$s$)-diagram van een niet-constante kracht

Bepaal de arbeid die de kracht heeft verricht.

*Uitwerking*
De gevraagde arbeid is gelijk aan de oppervlakte onder de grafiek. Deze kun je op verschillende manieren vinden, bijvoorbeeld door de hokjes te tellen. Onder de grafiek liggen 13 grote hokjes. De oppervlakte van één hokje is 5,0 m × 10,0 N = 50 J. Dus er geldt:
$W = 13 \times 50 = 6{,}5 \cdot 10^2$ J

Bij het ($F$,$s$)-diagram van een kracht die tegengesteld gericht is aan de verplaatsing, is de grootte van de arbeid de oppervlakte onder de grafiek. Maar omdat de arbeid van deze kracht negatief is, moet je er een minteken voor zetten.

## Totale arbeid

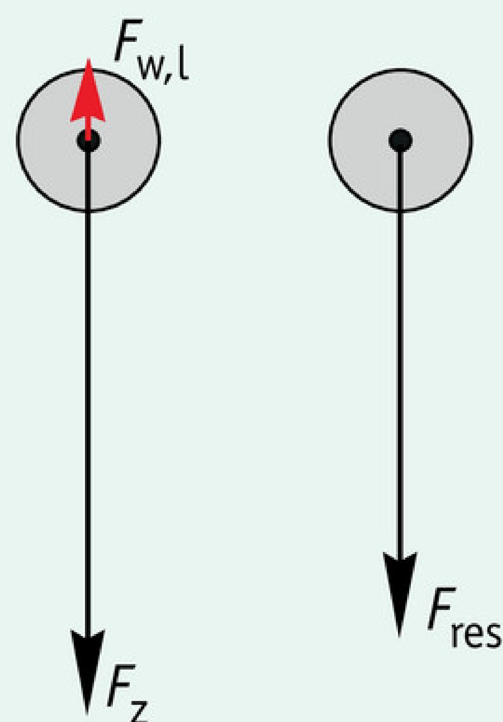
Soms werken er meer krachten tegelijkertijd op een voorwerp. Je kunt dan de totale arbeid $W_{tot}$ uitrekenen. Dit kan op twee manieren.

1 Reken voor elke kracht apart de arbeid uit. Tel vervolgens al deze hoeveelheden arbeid bij elkaar op.
2 Bereken eerst de resulterende kracht $F_{res}$ van alle krachten. Bereken vervolgens de arbeid van deze resulterende kracht.

Welke van de twee manieren je gebruikt, mag je zelf weten. In voorbeeldopgave 4 zie je ze allebei een keer toegepast.

**Voorbeeldopgave 4**

Van een 80 m hoge toren valt een steen van 1,5 kg omlaag (figuur 4). Deze steen ondervindt een luchtweerstandskracht van gemiddeld 2,0 N.




▲ **figuur 4** krachten op een vallende steen

Bereken op twee manieren de totale arbeid die tijdens de val op de steen wordt verricht.

*Uitwerking*
*Manier 1*
Op de steen werken twee krachten: de zwaartekracht $F_z$ en de luchtweerstandskracht $F_{w,l}$.
$m = 1{,}5$ kg
$F_z = m \cdot g = 1{,}5 \times 9{,}81 = 14{,}7$ N
$F_{w,l} = 2{,}0$ N
$W_{Fz} = F_z \cdot s = 14{,}7 \times 80 = 1{,}18 \cdot 10^3$ J
$W_{Fw,l} = -F_{w,l} \cdot s = -2{,}0 \times 80 = -1{,}6 \cdot 10^2$ J
$W_{tot} = W_{Fz} + W_{Fw,l} = 1{,}18 \cdot 10^3 + -1{,}6 \cdot 10^2 = 1{,}0 \cdot 10^3$ J

*Manier 2*
$m = 1{,}5$ kg
$F_z = m \cdot g = 1{,}5 \times 9{,}81 = 14{,}7$ N (omlaag gericht)
$F_{w,l} = 2{,}0$ N (omhoog gericht, tegengesteld aan de bewegingsrichting)
$F_{res} = F_z - F_{w,l} = 14{,}7 - 2{,}0 = 12{,}7$ N (omlaag gericht)
$W_{tot} = W_{Fres} = F_{res} \cdot s = 12{,}7 \times 80 = 1{,}0 \cdot 10^3$ J (denk aan significantie!)

**Onthoud!**

- Een kracht verricht arbeid als deze kracht in dezelfde richting werkt als de verplaatsing. Voor de arbeid van deze kracht geldt: $W = F \cdot s$
- Als een kracht tegengesteld gericht is aan de verplaatsing, geldt voor de verrichtte arbeid: $W = -F \cdot s$
- De arbeid van een kracht komt overeen met de oppervlakte onder de $(F,s)$-grafiek. Wanneer de kracht tegengesteld gericht is aan de verplaatsing, is de arbeid negatief (er staat een minteken voor).
- De totale arbeid op een voorwerp kun je uitrekenen door van elke kracht de arbeid uit te rekenen en deze bij elkaar op te tellen. Je kunt ook eerst de resulterende kracht uitrekenen en vervolgens de arbeid uitrekenen van deze resulterende kracht.

## Opdrachten

**1** Arbeid

Maak de volgende opdrachten.

**a** Geef de formules waarmee je de arbeid berekent die een kracht verricht.
**b** In welke eenheid wordt arbeid uitgedrukt?
**c** Hoe bereken je de arbeid van een kracht die tijdens het verplaatsen van een voorwerp van grootte verandert?
**d** Geef twee manieren waarop je de totale arbeid op een voorwerp berekent als er meer krachten op werken.

**2** Wel of geen arbeid

Wordt er in de volgende situaties arbeid verricht? Zo ja, geef aan welke kracht(en) er arbeid verricht(en) en waarop deze arbeid wordt verricht.

**a** Tijdens het afdrogen van de vaat valt er een bord uit je handen.
**b** Een zeilboot vaart bij een harde wind met een behoorlijke snelheid.
**c** Een vogel zit op de tak van een boom.
**d** Bij het flipperen wordt een bal weggeschoten door een ingedrukte veer die zich weer ontspant.
**e** Bij het touwtrekken houden twee teams elkaar in evenwicht.

**3** Auto aanduwen

Tijdens een koude winterdag start de auto van je buurman niet. Je helpt hem de auto aan te duwen en oefent daarbij een horizontale kracht uit van 800 N. Na 20 m duwen start de auto en houd je op met duwen.
Bereken de arbeid die jouw spierkracht heeft verricht.

**4** Doos optillen

Je tilt een doos boeken met een massa van 15 kg vanaf de grond. Daarbij verricht jouw spierkracht 75 J arbeid.
Bereken hoe hoog je de doos hebt opgetild.

**5** Halter

Je tilt een halter met een massa van 8,00 kg vanaf de grond met constante snelheid op tot 1,80 m hoogte en laat hem vervolgens vallen.

**a** Bereken de arbeid die de spierkracht verricht bij het optillen van de halter.
**b** Bereken de arbeid die de zwaartekracht verricht bij het optillen van de halter.
**c** Bereken op twee manieren de totale arbeid op de halter tijdens het optillen ervan.
**d** Bereken de arbeid die de zwaartekracht verricht als de halter valt.

**6** Arbeid op de maan
Ook op de maan is er zwaartekracht.
Leg uit of je op de maan meer, minder of evenveel arbeid moet verrichten dan op aarde om een massa tot een bepaalde hoogte op te tillen.

**7** Bouw van een stuwdam
Voor de bouw van de stuwdam bij de Drieklovendam in China was 2,689 miljoen $m^3$ beton nodig. Deze hoeveelheid beton moest met een hijskraan gemiddeld 95 m omhoog worden gebracht.

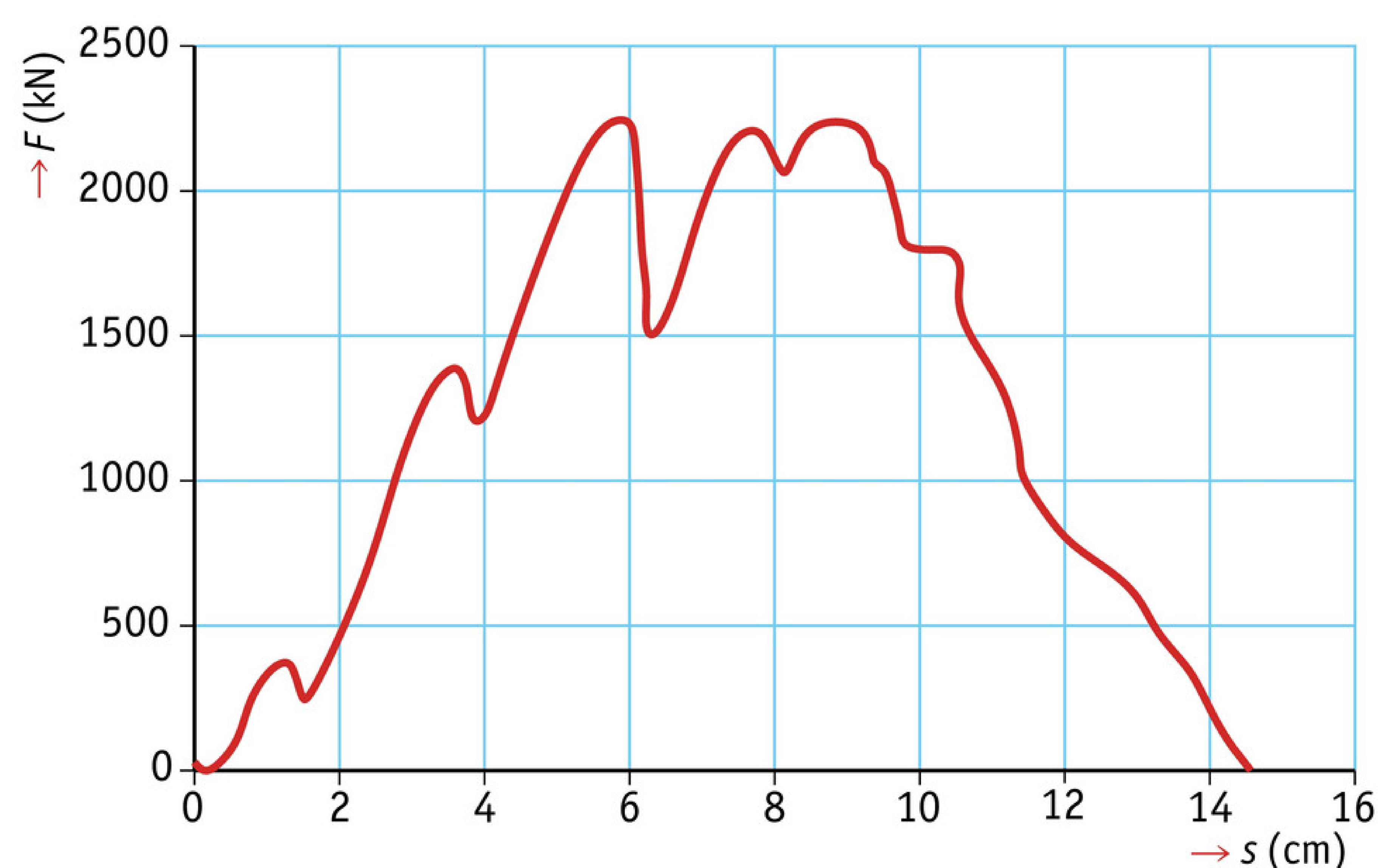
**a** Bereken de arbeid die de hijskraan hiervoor heeft moeten verrichten. Gebruik de gemiddelde dichtheid van beton en ga ervan uit dat de hijskraan het beton met constante snelheid omhoog heeft gehesen.
**b** Leg uit of de zwaartekracht hierbij arbeid heeft verricht.

**8** Totale arbeid
Een auto van 1000 kg ondervindt een totale wrijvingskracht van 800 N. De motor levert een voortstuwende kracht van 2,0 kN. De auto rijdt 25 s lang met een gemiddelde snelheid van 50 km $h^{-1}$.
Bereken de totale arbeid die op de auto wordt verricht.

**9** Arbeid bij het uitrekken van een veer
Een veer met een veerconstante van 10,0 N $m^{-1}$ wordt 8,0 cm uitgerekt.

**a** Teken het $(F,u)$-diagram waarbij $u$ varieert van 0 cm tot 8,0 cm.
**b** Bepaal met behulp van dit diagram de gemiddelde waarde van de kracht $F$ die de veer uitrekt.
**c** Bereken met behulp van deze gemiddelde waarde de arbeid die wordt verricht op de veer als deze uitrekt tot 8,0 cm.
**d** Bepaal met behulp van het diagram de arbeid die wordt verricht op de veer als deze uitrekt tot 6,0 cm.

**10** Auto tegen boom
Een auto rijdt tegen een boom. In figuur 5 zie je de kracht op de auto uitgezet tegen de afstand tijdens de botsing.




▲ **figuur 5** het $(F,s)$-diagram van de kracht op een botsende auto

Bepaal de arbeid die de kracht van de boom uitoefent op de auto.

**+11** Voorwerp optillen

Stel, je tilt een voorwerp van 3,0 kg op en zet het 2,0 m hoger neer. Bij het berekenen van de arbeid die de spierkracht verricht, ga je ervan uit dat je het voorwerp met een constante snelheid optilt, terwijl dat eigenlijk niet het geval is.

**a** Hoe verandert de snelheid van dat voorwerp?

**b** Hoe groot is de benodigde spierkracht die op het voorwerp werkt tijdens het optillen in vergelijking met de zwaartekracht die op dat voorwerp werkt?

**c** Leg uit dat je bij het berekenen van de arbeid die de spierkracht verricht, mag doen alsof de snelheid waarmee het voorwerp wordt opgetild, constant is.

# 2 Energiesoorten

In deze paragraaf leer je:
- de kinetische en zwaarte-energie berekenen;
- de chemische energie in een vloeistof en gas berekenen;
- soorten energie kennen.

De grootheid energie ben je in de onderbouw al tegengekomen. Energie geef je aan met het symbool *E*. Energie wordt, net als arbeid, uitgedrukt in de eenheid J of N m.

## Wat is energie?

Het is moeilijk precies te zeggen wat **energie** is. Energie heeft te maken met arbeid, want energie en arbeid hebben dezelfde eenheid. Als een mens of een machine energie bezit, is deze in staat om arbeid te verrichten, dus om een ander voorwerp te verplaatsen. De maximale hoeveelheid arbeid die kan worden verricht, is gelijk aan de hoeveelheid energie die de mens of de machine oorspronkelijk bezat. Met 10 J energie kan maximaal 10 J arbeid worden verricht. Als je arbeid verricht op een voorwerp, neemt de energie van dat voorwerp toe. Als je bijvoorbeeld 50 J arbeid verricht op een voorwerp, neemt de energie van dat voorwerp met maximaal 50 J toe.
Er zijn veel soorten energie. Voor sommige energiesoorten is er een formule waarmee je de hoeveelheid energie kunt uitrekenen.

## Mechanische energie

Kinetische energie, zwaarte-energie en veerenergie zijn vormen van **mechanische energie**, omdat ze alle drie met kracht en beweging te maken hebben.

***Kinetische energie***

Een bewegend voorwerp bezit energie. Dit is **bewegingsenergie**, die ook wel **kinetische energie** wordt genoemd. De hoeveelheid kinetische energie hangt af van de massa van het bewegend voorwerp en de snelheid ervan. Je berekent de kinetische energie met de formule:

$$E_k = ½ \cdot m \cdot v^2$$

Hierin is:
- $E_k$ de kinetische energie van het voorwerp in joule (J) of newtonmeter (N m);
- $m$ de massa van het voorwerp in kilogram (kg);
- $v$ de snelheid van het voorwerp in meter per seconde (m $s^{-1}$).

De kinetische energie van een bewegend voorwerp is recht evenredig met de massa. Een 2× zo zwaar voorwerp heeft bij dezelfde snelheid een 2× zo grote kinetische energie. De kinetische energie van een bewegend voorwerp is recht evenredig met het kwadraat van de snelheid van dat voorwerp. Als het voorwerp 2× zo snel gaat, heeft het 4× zo veel kinetische energie.

**Voorbeeldopgave 5**

Een personenauto van 1100 kg rijdt met een snelheid van 120 km $h^{-1}$.
Bereken de kinetische energie van de auto.

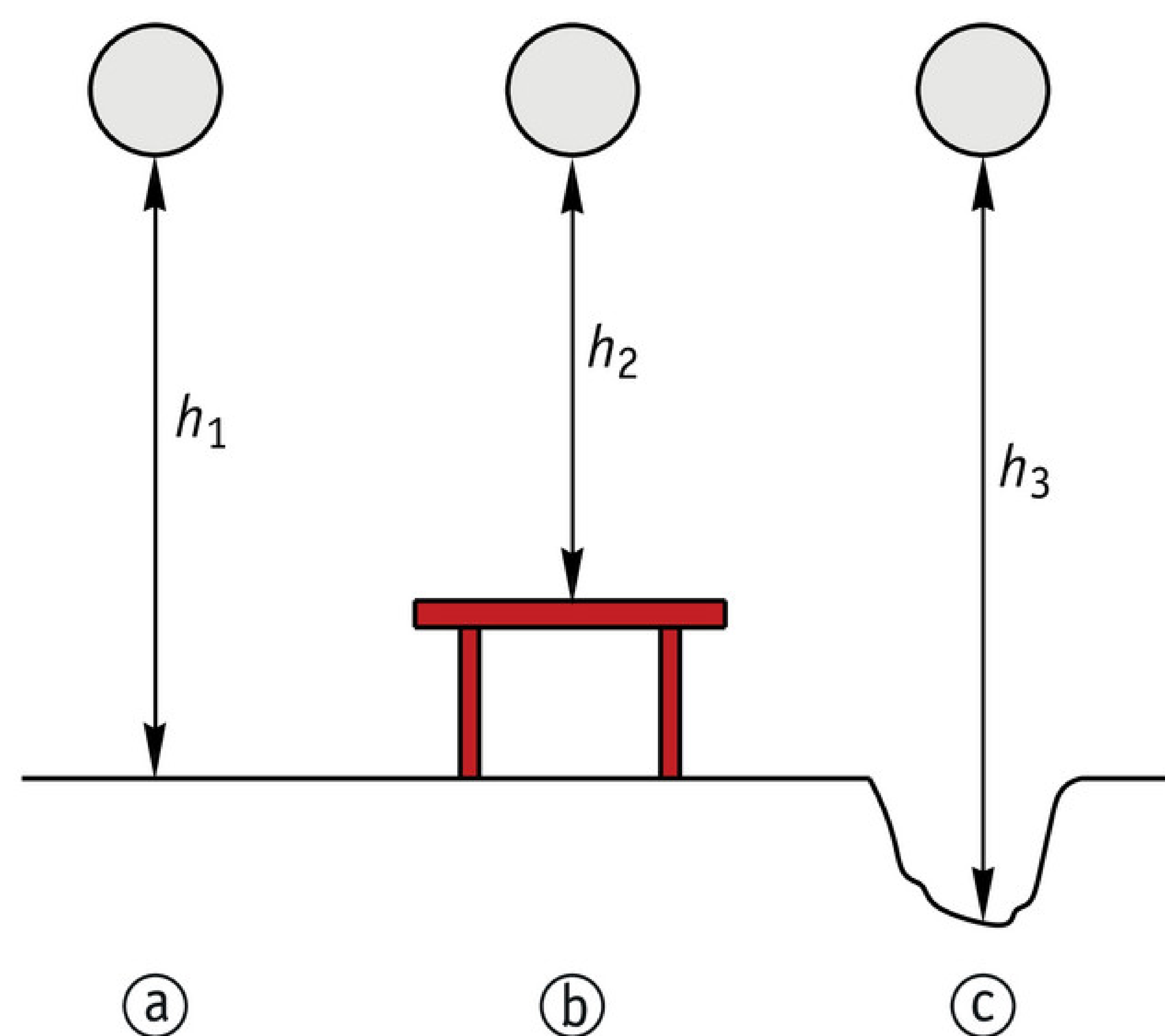
*Uitwerking*
$m = 1100$ kg
$v = 120$ km $h^{-1} = 33{,}3$ m $s^{-1}$
$E_k = ½ \cdot m \cdot v^2 = ½ \times 1100 \times 33{,}3^2 = 6{,}11 \cdot 10^5$ J

***Zwaarte-energie***
Als je een voorwerp met massa $m$ vanaf de grond over een afstand $s$ optilt tot een hoogte $h$, verricht jouw spierkracht arbeid. Als je dat voorwerp met constante snelheid optilt, geldt:
$F_{spier} = F_z = m \cdot g$
Je kunt de arbeid die jouw spierkracht heeft verricht, berekenen met:
$W_{Fspier} = F_{spier} \cdot s = F_z \cdot s = m \cdot g \cdot s$
De verplaatsing is gelijk aan de hoogte die het voorwerp bereikt: $s = h$
Invullen geeft: $W_{Fspier} = m \cdot g \cdot h$

Maar als de spierkracht een hoeveelheid arbeid verricht die gelijk is aan $m \cdot g \cdot h$, heeft het voorwerp een hoeveelheid energie gekregen die ook gelijk is aan $m \cdot g \cdot h$. Deze energiesoort heet **zwaarte-energie**.
Een voorwerp dat zich op een bepaalde hoogte boven de grond bevindt, heeft dus energie. De hoeveelheid zwaarte-energie op aarde hangt af van de massa van het voorwerp, de hoogte van het voorwerp boven de grond en de valversnelling. Je berekent de zwaarte-energie met de formule:

$$E_z = m \cdot g \cdot h$$

Hierin is:
- $E_z$ de zwaarte-energie van het voorwerp in joule (J) of newtonmeter (N m);
- $m$ de massa van het voorwerp in kilogram (kg);
- $g$ de valversnelling in meter per seconde kwadraat (m $s^{-2}$);
- $h$ de hoogte van het voorwerp boven de grond in meter (m).




**figuur 6** Een voorwerp kan verschillende hoeveelheden zwaarte-energie hebben, terwijl het zich op even grote hoogte bevindt.

Voor de hoogte moet je in deze formule de afstand invullen die het voorwerp kan vallen. Zo moet je voor de hoogte in de formule van de zwaarte-energie in figuur 6a hoogte $h_1$ invullen, in figuur 6b hoogte $h_2$ en in figuur 6c hoogte $h_3$.

Je mag de formule $E_z = m \cdot g \cdot h$ niet toepassen als een voorwerp zich op zeer grote hoogte boven de aarde bevindt. De valversnelling $g$ wordt namelijk kleiner naarmate de hoogte groter wordt. Zo is op 100 km hoogte $g$ afgenomen tot ongeveer 9,5 m $s^{-2}$.

**Voorbeeldopgave 6**

Een kogel van 300 g heeft een zwaarte-energie van 2,50 J.
Op welke hoogte bevindt de kogel zich?

*Uitwerking*
$m$ = 300 g = 0,300 kg
$g$ = 9,81 m $s^{-2}$
$E_z$ = 2,50 J
$E_z = m \cdot g \cdot h$ invullen geeft:
$2{,}50 = 0{,}300 \cdot 9{,}81 \cdot h$
Daaruit volgt: $2{,}50 = 2{,}943 \cdot h$, ofwel: $h = \dfrac{2{,}50}{2{,}943} = 0{,}849$ m.

▶ **EXPERIMENT 1** Stuiterend balletje

***Veerenergie***
Een veer waaraan een voorwerp hangt, bezit veerenergie. De hoeveelheid **veerenergie** hangt af van de uitrekking van de veer en de stugheid van de veer, dus van de veerconstante. Hoe groter de uitrekking en/of hoe groter de veerconstante, des te meer veerenergie. Veerenergie treedt niet alleen op bij een veer, maar bij alle voorwerpen die elastisch vervormen. Dus ook bij een elastiekje dat wordt uitgerekt, een plank die doorbuigt als iemand erop gaat staan en de gespannen boog van een boogschutter.

## Elektrische energie
Een elektrisch apparaat zet elektrische energie om, vaak in beweging, licht en warmte.

## Stralingsenergie
Een lamp zendt licht en warmte uit, een straalkachel zendt warmte uit en een röntgenapparaat zendt röntgenstraling uit. In al deze gevallen wordt **stralingsenergie** uitgezonden. Er zijn meer soorten stralingsenergie dan alleen zichtbaar licht.

## Warmte
In hoofdstuk 4 heb je geleerd dat warmte energie is die zich verplaatst van een plek met een hoge temperatuur naar een plek met een lagere temperatuur. Warmte ontstaat vaak als gevolg van wrijving.

## Chemische energie
Chemische energie is de energie die is opgeslagen in brandstoffen. Je kunt de energie vrijmaken met chemische processen zoals verbranding. Bij verbranding wordt chemische energie omgezet in warmte. Er zit chemische energie in de fossiele brandstoffen olie, aardgas en steenkool, maar ook in hout en papier.

Als je één kilogram steenkool verbrandt, komt er meer warmte vrij dan wanneer je één kilogram hout verbrandt. Er zit dus meer chemische energie in één kilogram steenkool dan in één kilogram hout. Om de chemische energie in verschillende brandstoffen goed met elkaar te kunnen vergelijken, is de grootheid **stookwaarde** bedacht. Deze wordt ook wel **verbrandingswarmte** genoemd.

De stookwaarde $r_m$ van een vaste stof is de hoeveelheid chemische energie die is opgeslagen in één kilogram vaste stof. Je kunt ook zeggen: de stookwaarde $r_m$ van een vaste stof is de hoeveelheid warmte die vrijkomt als je één kilogram van deze vaste stof verbrandt. Als je de stookwaarde van een vaste stof kent, kun je de chemische energie in deze stof berekenen met de formule:

$$E_{ch} = r_m \cdot m$$

Hierin is:
- $E_{ch}$ de chemische energie van de vaste stof in joule (J);
- $r_m$ de stookwaarde van de vaste stof in joule per kilogram (J $kg^{-1}$);
- $m$ de massa van de vaste stof in kilogram (kg).

Je vindt de stookwaarde van verschillende stoffen in Binas tabel 28B. Vergeet niet alle getallen uit deze tabel met de factor $10^6$ te vermenigvuldigen (zie boven aan de kolom in de tabel).

De stookwaarde $r_v$ van een vloeistof of gas is de hoeveelheid chemische energie die is opgeslagen in één kubieke meter vloeistof of gas. Je kunt ook zeggen: de stookwaarde $r_v$ van een vloeistof of gas is de hoeveelheid warmte die vrijkomt als je één kubieke meter van deze vloeistof of van dat gas verbrandt. Als je de stookwaarde van een vloeistof of gas kent, kun je de chemische energie in een brandstof berekenen met de formule:

$$E_{ch} = r_v \cdot V$$

Hierin is:
- $E_{ch}$ de chemische energie van de vloeistof of het gas in joule (J);
- $r_v$ de stookwaarde van de vloeistof of het gas in joule per kubieke meter (J $m^{-3}$);
- $V$ het volume van de vloeistof of het gas in kubieke meter ($m^3$).

Ook de stookwaarden van vloeistoffen en gassen staan in Binas tabel 28B. Vergeet niet alle getallen uit deze tabel met de factor $10^6$ (gassen) en $10^9$ (vloeistoffen) te vermenigvuldigen (zie boven aan de kolom in de tabel). De stookwaarde van een vaste stof wordt in een andere eenheid uitgedrukt dan de stookwaarde van een vloeistof of een gas, omdat een hoeveelheid vaste stof meestal wordt uitgedrukt in kilogram en een hoeveelheid vloeistof of gas in kubieke meter.

**Voorbeeldopgave 7**

Bereken hoeveel liter Gronings aardgas je moet verbranden om evenveel warmte te krijgen als er vrijkomt bij de verbranding van 500 kg steenkool.

*Uitwerking*
$m$ = 500 kg
Zoek de stookwaarde van steenkool op in Binas tabel 28B.
$r_m = 29 \cdot 10^6$ J $kg^{-1}$ (vergeet de factor $10^6$ niet!)
$E_{ch} = r_m \cdot m$ invullen geeft: $E_{ch} = 29 \cdot 10^6 \times 500 = 1{,}45 \cdot 10^{10}$ J
Bij de verbranding van 500 kg steenkool ontstaat dus $1{,}45 \cdot 10^{10}$ J warmte.

Reken nu uit hoeveel Gronings aardgas je moet verbranden om evenveel warmte te laten ontstaan. Er moet dus ook $1{,}45 \cdot 10^{10}$ J chemische energie in dat aardgas zitten.
Zoek de stookwaarde van Gronings aardgas op in Binas tabel 28B.
$r_v = 32 \cdot 10^6$ J m$^{-3}$
$E_{ch} = r_v \cdot V$ invullen geeft: $1{,}45 \cdot 10^{10} = 32 \cdot 10^6 \cdot V$

Daaruit volgt $V = \dfrac{1{,}45 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 10^6} = 4{,}5 \cdot 10^2$ m$^3$

Dit is gelijk aan $4{,}5 \cdot 10^5$ L

De mens heeft energie nodig om zijn lichaam op temperatuur te houden, om alle processen in het lichaam op gang te houden en om arbeid te kunnen verrichten. Die energie wordt verkregen uit voedsel. Voedsel bevat dus ook chemische energie. Je kunt het menselijk lichaam als een soort verbrandingsmotor zien. Het voedsel dat je eet, wordt verbrand en omgezet in vetten en suikers. De energie die in je lichaam vrijkomt bij het verbranden van voedsel, heet de **voedingswaarde**. Deze wordt vaak uitgedrukt in de eenheid kilocalorie (kcal). In Binas tabel 5 zie je dat 1,000 calorie (cal) gelijk is aan 4,184 J.

Ook in accu's en batterijen is chemische energie opgeslagen. Als deze stroom leveren, wordt de chemische energie door een scheikundige reactie omgezet in elektrische energie.

### Kernenergie

Kernenergie is de energie die is opgesloten in de kernen van atomen. Deze vorm van energie komt vrij bij kernsplijting in kerncentrales en kernfusie in sterren.

**Onthoud!**

- Energie wordt, net als arbeid, uitgedrukt in de eenheid J of N m.
- Kinetische energie bereken je met de formule $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Zwaarte-energie bereken je met de formule $E_z = m \cdot g \cdot h$
- De stookwaarde $r_m$ van een vaste stof is de hoeveelheid chemische energie die is opgeslagen in één kilogram vaste stof, ofwel de hoeveelheid warmte die vrijkomt als je één kilogram van deze vaste stof verbrandt.
- De stookwaarde $r_v$ van een vloeistof of gas is de hoeveelheid chemische energie die is opgeslagen in één kubieke meter vloeistof of gas, ofwel de hoeveelheid warmte die vrijkomt als je één kubieke meter van deze vloeistof of van dat gas verbrandt.
- Je berekent de hoeveelheid chemische energie in een brandstof met de formules $E_{ch} = r_m \cdot m$ en $E_{ch} = r_v \cdot V$

**Opdrachten**

**12** Kinetische energie en zwaarte-energie
Kinetische energie en zwaarte-energie zijn vormen van mechanische energie.
**a** Geef de formule waarmee je de kinetische energie van een bewegend voorwerp berekent.
**b** In welke eenheden druk je de grootheden in deze formule uit?
**c** Geef de formule waarmee je de zwaarte-energie van een voorwerp berekent.
**d** In welke eenheden druk je de grootheden in deze formule uit?

**13** Chemische energie en stookwaarde
Beantwoord de volgende vragen.
**a** Leg uit wat chemische energie is.
**b** Geef twee definities van de stookwaarde van een vaste stof.
**c** Geef de formule waarmee je de chemische energie in een vaste stof berekent.
**d** In welke eenheden druk je de grootheden in deze formule uit?
**e** Leg uit wat de stookwaarde van een gas of vloeistof is.
**f** Geef de formule waarmee je de chemische energie in een vloeistof of in een gas berekent.
**g** In welke eenheden druk je de grootheden in deze formule uit?

**14** Vliegende bal
Energie bezitten betekent in staat zijn arbeid te verrichten.
**a** Leg uit dat een bal die door de lucht vliegt kinetische energie heeft.
**b** Leg uit dat een ingedrukte veer veerenergie bezit.

**15** Fietser
Een fietser (70 kg inclusief fiets) heeft een snelheid van 30 km $h^{-1}$.
**a** Bereken de kinetische energie van de fietser.
**b** De fietser remt af en rijdt vervolgens met een snelheid van 15 km $h^{-1}$ verder. Beredeneer hoe groot de kinetische energie van de fietser nu is geworden.

**16** Drie bewegende voorwerpen
Voorwerp A beweegt en heeft een bepaalde kinetische energie. Voorwerp B is 2× zo zwaar en beweegt met een 3× zo grote snelheid. De massa van voorwerp C is de helft van de massa van voorwerp A en voorwerp C heeft dezelfde kinetische energie als voorwerp B.
**a** Beredeneer hoeveel kinetische energie voorwerp B heeft vergeleken met die van voorwerp A.
**b** Leg uit hoeveel keer zo groot de snelheid van voorwerp C is in vergelijking met die van voorwerp A.

**17** Energieverlies van stuiterend balletje
Emma wil meer te weten komen over het energieverlies bij het stuiteren van een balletje. Ze slaagt erin om de verhouding van de snelheden van het balletje net voor en net na de stuit te bepalen. Deze snelheden verhouden zich als 10 : 6. De kinetische energie van het balletje neemt dus af.
Hoeveel procent van de kinetische energie is er onmiddellijk na het stuiteren nog over?
A 6%
B 36%
C 40%
D 60%
E 64%

**18** Omvallende wand
Een houten wand is 2,0 m lang, 1,20 m hoog en 10 cm breed. De wand weegt 80 kg.
**a** Bereken de zwaarte-energie van de wand.
**b** Bereken de afname van de zwaarte-energie als de wand omvalt en daarna plat op de grond ligt.

**19** Zwaarte-energie van het water in een stuwmeer
De Chinese Drieklovendam sluit een stuwmeer af met een oppervlakte van 1085 km². Het stuwmeer bevat gemiddeld 39,3 miljard m³ water.
**a** Bereken de zwaarte-energie van het water in het stuwmeer ten opzichte van de bodem van dat meer.
**b** Leg uit dat het water in het stuwmeer in feite veel meer zwaarte-energie heeft dan de bij opdracht a berekende waarde.

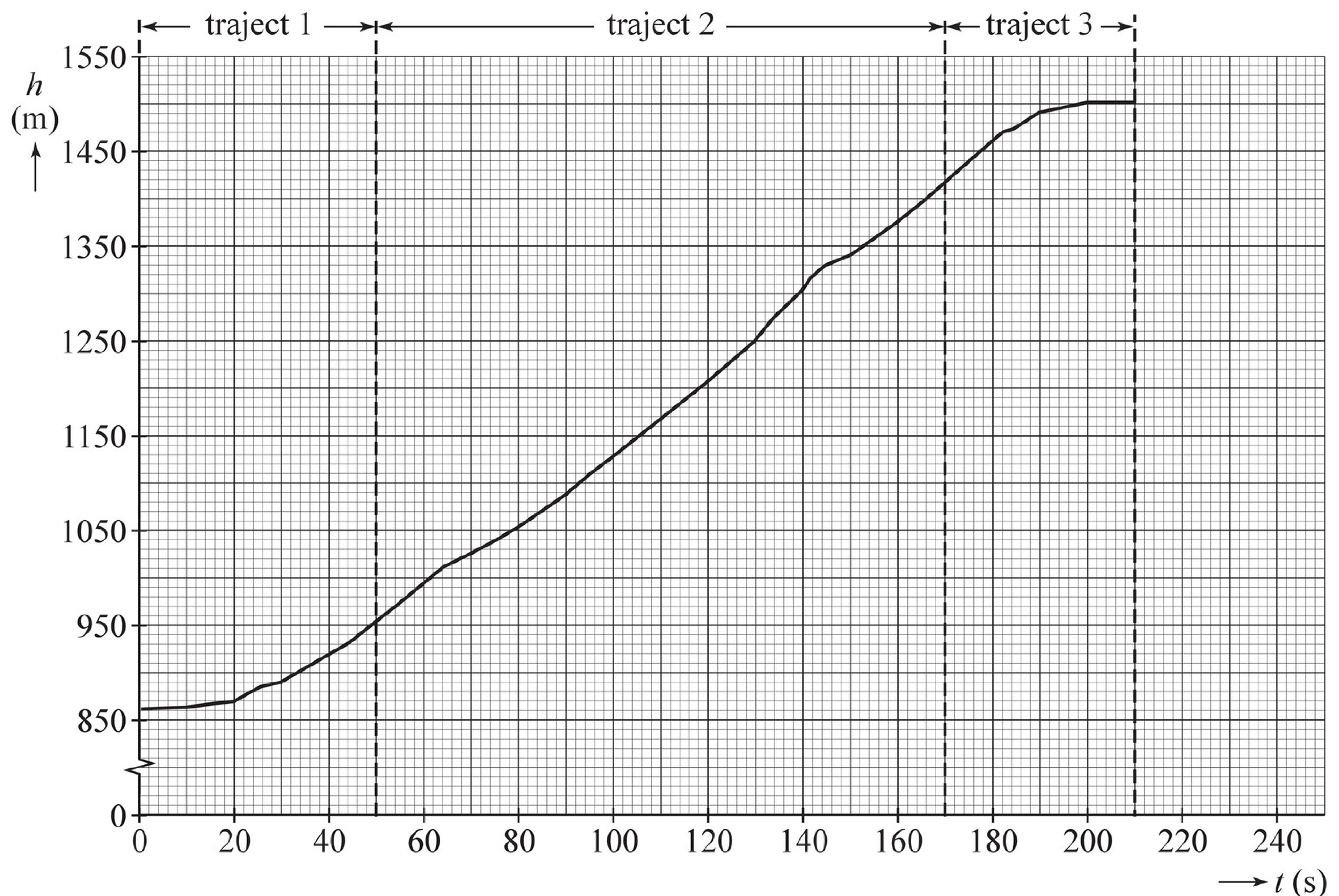
**20** Lucifer
Vera steekt een vurenhouten lucifer (5,0 cm × 2,0 mm × 2,0 mm) aan. Bekijk alleen het luciferhoutje.
**a** Bereken de massa van de lucifer.
**b** Bereken hoeveel warmte er vrijkomt als deze lucifer helemaal opbrandt.
**c** Bereken hoeveel milliliter methaan je moet verbranden om evenveel warmte te laten vrijkomen.

**21** Papier
Evie heeft een allesbrander. Ze bewaart oud papier om dat vervolgens in de allesbrander te verbranden. Uiteindelijk heeft ze een grote doos van 50 cm × 30 cm × 40 cm helemaal vol met papier. De gemiddelde dichtheid van dat papier is 0,85 g $cm^{-3}$. Als ze al het papier heeft verbrand, is er $7{,}6 \cdot 10^{8}$ J warmte vrijgekomen.
**a** Bereken de stookwaarde van papier.
**b** Reken deze stookwaarde om naar kilowattuur per kilogram (kWh $kg^{-1}$).

**22** Woon-werkverkeer
In Nederland wordt voor woon-werkverkeer gemiddeld 22 km gereden (enkele reis). Een bepaalde personenauto rijdt 15 km op 1,0 L benzine.
**a** Bereken hoeveel arbeid je maximaal kunt verrichten met 1,0 L benzine.
**b** Hoeveel energie is nodig om met deze auto heen en terug naar het werk te gaan? Ga uit van een gemiddelde rit.

**23** Drone
In een drone zitten twee accu's. Zo'n accu bevat 12 kJ energie. De drone weegt 450 g.
Bereken welke hoogte de drone kan bereiken als alle energie uit de batterijen wordt omgezet in zwaarte-energie.

**24** Mürrenbahn
Aan de rand van de Zwitserse Alpen ligt het dorpje Mürren. Dit dorp is niet per auto te bereiken. Reizigers van en naar het dorp moeten gebruikmaken van een kabelbaan: de Mürrenbahn.
Anoek heeft een rit in de Mürrenbahn gemaakt. Zij heeft een gps bij zich waarmee ze tijdens de rit de hoogte van de cabine ten opzichte van de grond heeft gemeten.
Het bijbehorende $(h,t)$-diagram is in figuur 7 weergegeven. In het diagram zijn drie trajecten aangegeven: in traject 1 versnelt de cabine, in traject 2 beweegt de cabine met constante snelheid, in traject 3 remt de cabine weer af.




▲ **figuur 7** het ($h$,$t$)-diagram van Anoek

De cabine met passagiers heeft een massa van 23,6 ton en wordt door een motor schuin omhooggetrokken. In traject 2 is de snelheid in verticale en horizontale richting (ongeveer) constant.
Alle wrijvingskrachten op de cabine worden verwaarloosd.
Bepaal de arbeid die de motor in traject 2 heeft verricht.

*naar: pilotexamen 2015-I*

# 3 Wet van arbeid en kinetische energie

In deze paragraaf leer je:

- het verband tussen arbeid en kinetische energie gebruiken.

Als een kracht arbeid verricht op een voorwerp, verandert de kinetische energie van dat voorwerp. Deze kinetische energie kan toenemen of afnemen.

## Verband tussen arbeid en kinetische energie

Als een automobilist optrekt, werkt er op de auto een resulterende kracht in de rijrichting. Deze resulterende kracht zorgt ervoor dat de auto versnelt, want $F_{res} = m \cdot a$. De resulterende kracht verricht positieve arbeid op de auto, waardoor zijn snelheid, en dus zijn kinetische energie, toeneemt.

Als een automobilist moet remmen, dan werkt er op de auto een resulterende kracht tegengesteld gericht aan de rijrichting. Deze resulterende kracht zorgt ervoor dat de auto vertraagt. De resulterende kracht werkt tegengesteld aan de verplaatsing, dus de arbeid is negatief. De snelheid van de auto en daardoor ook zijn kinetische energie neemt af.
Het volgende geldt altijd:

Als de totale arbeid op een voorwerp positief is, neemt de kinetische energie van dat voorwerp toe.
Als de totale arbeid op een voorwerp negatief is, neemt de kinetische energie van dat voorwerp af.

De **wet van arbeid en kinetische energie** (WAK) geeft het verband tussen de totale arbeid op een voorwerp en de kinetische energie ervan. De WAK luidt als volgt: de totale arbeid op een voorwerp is even groot als de verandering van de kinetische energie van dat voorwerp. In formulevorm:

$$W_{tot} = \Delta E_k$$

Hierin is:
- $W_{tot}$ de totale arbeid op het voorwerp in joule (J);
- $\Delta E_k = E_{k,eind} - E_{k,begin}$ de verandering van de kinetische energie van dat voorwerp in joule (J).

Als er maar één kracht arbeid verricht, is $W_{tot}$ de arbeid die door deze kracht wordt verricht. Als er meer krachten arbeid verrichten, moet je voor $W_{tot}$ de totale arbeid invullen. In paragraaf 1 heb je gezien dat je $W_{tot}$ op twee verschillende manieren kunt uitrekenen: eerst de resulterende kracht uitrekenen en dan de arbeid van deze resulterende kracht berekenen, of van elke kracht apart de arbeid uitrekenen en dan al deze hoeveelheden arbeid bij elkaar optellen.
Je schrijft de WAK meestal iets uitgebreider op:

$$W_{tot} = ½ \cdot m \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot m \cdot v^2_{begin}$$

Hierin is:
- $W_{tot}$ de totale arbeid op het voorwerp in joule (J);
- $m$ de massa van het voorwerp waarop de arbeid wordt verricht in kilogram (kg);
- $v_{eind}$ de eindsnelheid, dat wil zeggen de snelheid nadat de arbeid is verricht, in meter per seconde (m s$^{-1}$);
- $v_{begin}$ de beginsnelheid, dat wil zeggen de snelheid voordat de arbeid wordt verricht, in meter per seconde (m s$^{-1}$).

Als de snelheid van een voorwerp toeneemt, is $\Delta E_k$ ofwel: $½ \cdot m \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot m \cdot v^2_{begin}$ positief. Uit de WAK volgt dan dat de totale arbeid ook positief is. Dus heeft de resulterende kracht dezelfde richting als de verplaatsing.
Als de snelheid van een voorwerp kleiner wordt, is $\Delta E_k$ ofwel: $½ \cdot m \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot m \cdot v^2_{begin}$ negatief. Uit de WAK volgt dan dat de totale arbeid ook negatief is. Dus werkt de resulterende kracht tegengesteld gericht aan de verplaatsing.
Hoe je met de WAK kunt werken, zie je in voorbeeldopgaven 8, 9 en 10.

**Voorbeeldopgave 8**

Een kracht van 0,75 N werkt op een stilstaande speelgoedtrein van 500 g (figuur 8).




◀ **figuur 8** de kracht op een speelgoedtrein

Bereken de snelheid van het treintje na 1,20 m. Verwaarloos de wrijving.

*Uitwerking*
Er verricht maar één kracht arbeid: de kracht van 0,75 N.
$F = 0{,}75$ N
$s = 1{,}20$ m
$m = 500$ g $= 0{,}500$ kg
$v_{begin} = 0$ m s$^{-1}$
Gebruik de WAK:
$W_{tot} = \Delta E_k$
$F \cdot s = ½ \cdot m \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot m \cdot v^2_{begin}$
$0{,}75 \cdot 1{,}20 = ½ \cdot 0{,}500 \cdot v^2_{eind} - ½ \times 0{,}500 \times 0^2$
$0{,}90 = 0{,}250 \cdot v^2_{eind}$

Daaruit volgt: $v_{eind} = \sqrt{\dfrac{0{,}90}{0{,}250}} = 1{,}9$ m s$^{-1}$

Deze voorbeeldopgave kun je ook oplossen met de wetten van Newton.

**Voorbeeldopgave 9**

Een regendruppel van 60 mg valt zonder beginsnelheid omlaag over een afstand van 100 m. Bereken de snelheid waarmee de druppel neerkomt als deze een gemiddelde luchtwrijving van $35 \cdot 10^{-5}$ N ondervindt.

*Uitwerking*
$m = 60$ mg $= 60 \cdot 10^{-6}$ kg
$g = 9{,}81$ m s$^{-2}$
$F_z = m \cdot g = 60 \cdot 10^{-6} \times 9{,}81 = 5{,}886 \cdot 10^{-4}$ N
$F_w = 35 \cdot 10^{-5}$ N
$F_{res} = F_z - F_w = 5{,}886 \cdot 10^{-4} - 35 \cdot 10^{-5} = 2{,}386 \cdot 10^{-4}$ N
$s = 100$ m
$v_{begin} = 0$ m s$^{-1}$
Gebruik de WAK:
$W_{tot} = \Delta E_k$
$F_{res} \cdot s = ½ \cdot m \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot m \cdot v^2_{begin}$
$2{,}386 \cdot 10^{-4} \cdot 100 = ½ \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot v^2_{eind} - ½ \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot 0^2$
$2{,}386 \cdot 10^{-2} = 30 \cdot 10^{-6} \cdot v^2_{eind}$

Daaruit volgt: $v_{eind} = \sqrt{\dfrac{2{,}386 \cdot 10^{-2}}{30 \cdot 10^{-6}}} = 28$ m s$^{-1}$

Je kunt $W_{tot}$ ook uitrekenen door de arbeid van de zwaartekracht en de arbeid van de wrijvingskracht apart uit te rekenen en deze op te tellen.

**Voorbeeldopgave 10**

Een straaljager met massa 1,5 ton landt met een snelheid van 180 km $h^{-1}$ op een vliegdekschip. Een soort elastiek, *arresting gear* genoemd, remt het vliegtuig in 30 m af tot stilstand. Bereken de gemiddelde remkracht die het elastiek op het vliegtuig uitoefent. Verwaarloos de wrijvingskrachten op het vliegtuig.

*Uitwerking*
Er wordt door maar één kracht arbeid verricht, namelijk de remkracht die het elastiek op het vliegtuig uitoefent. Deze arbeid is negatief.
$m$ = 1,5 ton = $1{,}5 \cdot 10^3$ kg
$v_{begin}$ = 180 km $h^{-1}$ = 50,0 m $s^{-1}$
$v_{eind}$ = 0 m $s^{-1}$
$s$ = 30 m
Gebruik de WAK:
$W_{tot} = \Delta E_k$
$-F_{rem} \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{eind}^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{begin}^2$
$-F_{rem} \cdot 30 = \frac{1}{2} \times 1{,}5 \cdot 10^3 \times 0^2 - \frac{1}{2} \times 1{,}5 \cdot 10^3 \times 50{,}0^2$
$-30 \cdot F_{rem} = -1{,}875 \cdot 10^6$
Vermenigvuldig links en rechts met –1:
$30 \cdot F_{rem} = 1{,}875 \cdot 10^6$

Daaruit volgt: $F_{rem} = \dfrac{1{,}875 \cdot 10^6}{30} = 6{,}3 \cdot 10^4$ N

Dit is de gemiddelde remkracht.

De WAK is ook bruikbaar als de kracht die arbeid verricht, niet constant is. In een ($F$,$s$)-diagram van deze kracht kun je de arbeid vinden als de oppervlakte onder de grafiek (zie paragraaf 1).

Je hebt in hoofdstuk 3 de eerste wet van Newton geleerd: de snelheid van een voorwerp is constant als de resulterende kracht op dat voorwerp nul is. Dat blijkt ook uit de WAK. Want als de resulterende kracht nul is, is de verrichte arbeid ook nul: $W = F_{res} \cdot s = 0 \cdot s = 0$ J.
De WAK zegt dan dat de verandering van de kinetische energie ook nul is ($\Delta E_k = 0$) en dat betekent dat de kinetische energie, en dus de snelheid van het voorwerp, niet verandert.

▶ **EXPERIMENT 2** Het springend gewichtje

**Onthoud!**

- Als de totale arbeid op een voorwerp positief is, dan neemt de kinetische energie van dat voorwerp toe.
- Als de totale arbeid op een voorwerp negatief is, dan neemt de kinetische energie van dat voorwerp af.
- De totale arbeid op een voorwerp is even groot als de verandering van de kinetische energie van dat voorwerp: $W_{tot} = \Delta E_k$. Iets uitgebreider: $W_{tot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{eind}^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{begin}^2$

## Opdrachten

**25** WAK

Maak de volgende opdrachten.

**a** Geef de wet van arbeid en kinetische energie in woorden.

**b** Geef de wet van arbeid en kinetische energie in formulevorm.

**c** Hoe volgt de eerste wet van Newton uit de wet van arbeid en kinetische energie?

**26** Vallende kogels

Een stalen kogel van 5,0 kg wordt 4,0 m boven de grond losgelaten.

**a** Bereken de snelheid waarmee de kogel de grond bereikt als de wrijvingskracht te verwaarlozen is.

**b** Bereken de snelheid waarmee de kogel de grond bereikt als de wrijvingskracht gemiddeld 6,0 N bedraagt.

Een kogel met onbekende massa wordt 6,0 m boven de grond losgelaten.

**c** Bereken de snelheid waarmee de kogel de grond bereikt als de wrijving te verwaarlozen is.

**d** Leg uit dat je de snelheid waarmee de kogel de grond bereikt, niet kunt berekenen, ook al ken je de grootte van de gemiddelde wrijvingskracht.

**27** Kogel

Een kogel van 200 g vliegt met een snelheid van 2,2 km $s^{-1}$ tegen een gipsmuur.

**a** Bereken hoe diep de kogel in de muur doordringt als de gemiddelde remkracht van de muur $9{,}6 \cdot 10^5$ N bedraagt.

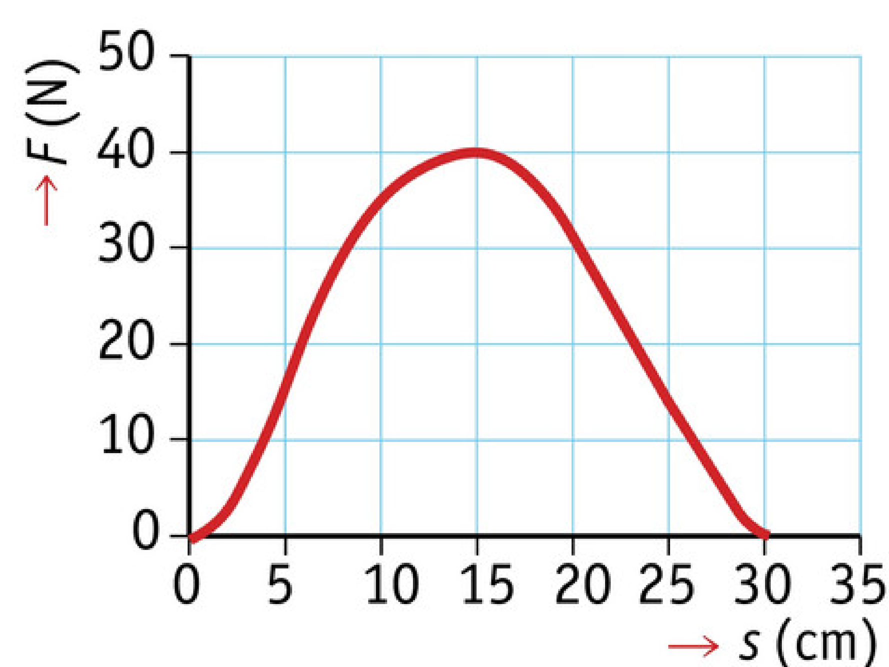
**b** Bereken met welke snelheid de kogel aan de achterkant uit de muur komt als deze maar 20 cm dik zou zijn.

**28** Bal omhoog

Sanne gooit vanaf een balkon op 8,0 m hoogte een bal van 300 g met 7,0 m $s^{-1}$ omhoog. Bereken het hoogste punt ten opzichte van de grond dat deze bal bereikt als de gemiddelde wrijvingskracht op de bal 0,75 N bedraagt.

**29** Voetbal wegschieten

Marcel schiet een voetbal van 430 g weg. In het diagram van figuur 9 is de spierkracht van Marcel uitgezet tegen de afstand waarover deze wordt uitgeoefend.




▲ **figuur 9** het ($F$,$s$)-diagram van het wegschieten van een bal

**a** Bepaal de arbeid die de spierkracht van Marcel verricht bij het wegschieten van de voetbal.

**b** Bepaal de snelheid waarmee hij de bal wegschiet.

**30** Energieopwekking bij een stuwmeer
Bij de Chinese Drieklovendam staat het water in het stuwmeer aan de ene kant van de damwand 110 m hoger dan aan de andere kant van de damwand. Ga ervan uit dat het water bij de opwekking van elektriciteit recht omlaag valt.
Bereken met de WAK de snelheid die het water heeft na een val van 110 m.

**31** Raceauto
Tijdens het testen op het racecircuit versnelt een raceauto vanuit stilstand en bereikt na 80 m een snelheid van 100 km $h^{-1}$.

**a** Leg uit na hoeveel meter de snelheid van de raceauto is verdubbeld tot 200 km/h als je ervan uit mag gaan dat de kracht van de motor en de totale wrijvingskrachten even groot blijven.
**b** Leg uit hoe groot de snelheid van de raceauto is na 40 m te hebben versneld als je er weer van uit mag gaan dat de kracht van de motor en de totale wrijvingskrachten even groot blijven.

**32** Trein in het web
In de film *Spiderman 2* stopt de held Spiderman een op hol geslagen trein met behulp van draden gesponnen uit spinrag. De trein in de film heeft een beginsnelheid van 25 m $s^{-1}$ en wordt in 50 s eenparig vertraagd tot stilstand gebracht. De massa van de trein met inzittenden is $2{,}0 \cdot 10^5$ kg.
Bereken de resulterende kracht die nodig is om de trein af te remmen.

*naar: examen 2015-II*

**33** Helling
Onder aan een helling met een hellingshoek van 34° ligt een voorwerp van 20,0 kg. Op dit voorwerp gaat evenwijdig aan het vlak omhoog een kracht $F_1$ werken van 150 N. De wrijvingskracht op het voorwerp is 15 N.

**a** Bereken de resulterende kracht op het voorwerp.
**b** Bereken de snelheid van het voorwerp na 30 m.

**+34** Uitrijden
Rolina (60 kg) fietst met een snelheid van 18 km $h^{-1}$. Als ze stopt met trappen en zich laat uitrijden, staat ze na 600 m stil.

**a** Bereken de gemiddelde wrijvingskracht als haar fiets 7,0 kg weegt.
**b** Bereken de wrijvingsarbeid.
**c** Teken een grafiek waarin de kinetische energie van Rolina tijdens het uitrijden is uitgezet tegen de afstand.

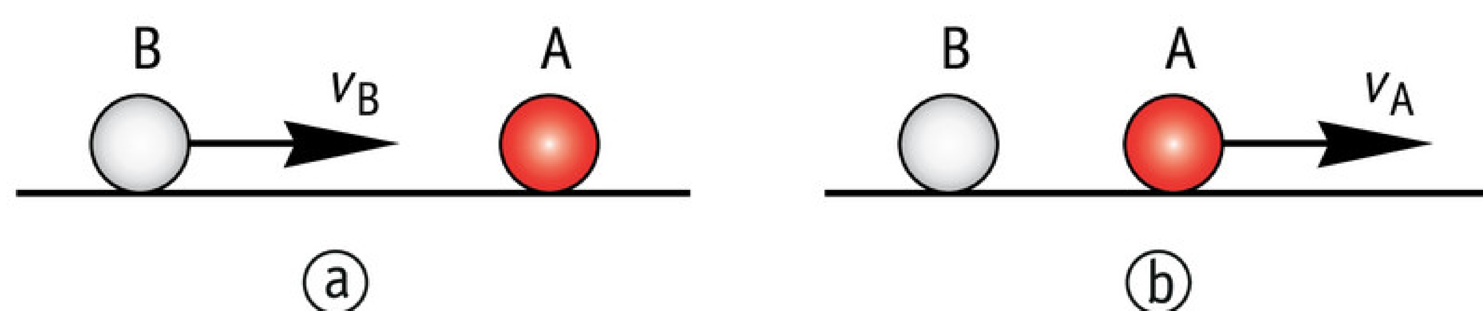
# 4 Wet van behoud van energie

In deze paragraaf leer je:
- energieoverdracht en -omzetting kennen;
- de wet van behoud van energie toepassen;
- de warmte berekenen die ontstaat als gevolg van wrijving.

Energie kan worden omgezet of overgedragen. Bij al deze processen geldt een van de belangrijkste wetten in de natuurkunde: de wet van behoud van energie.

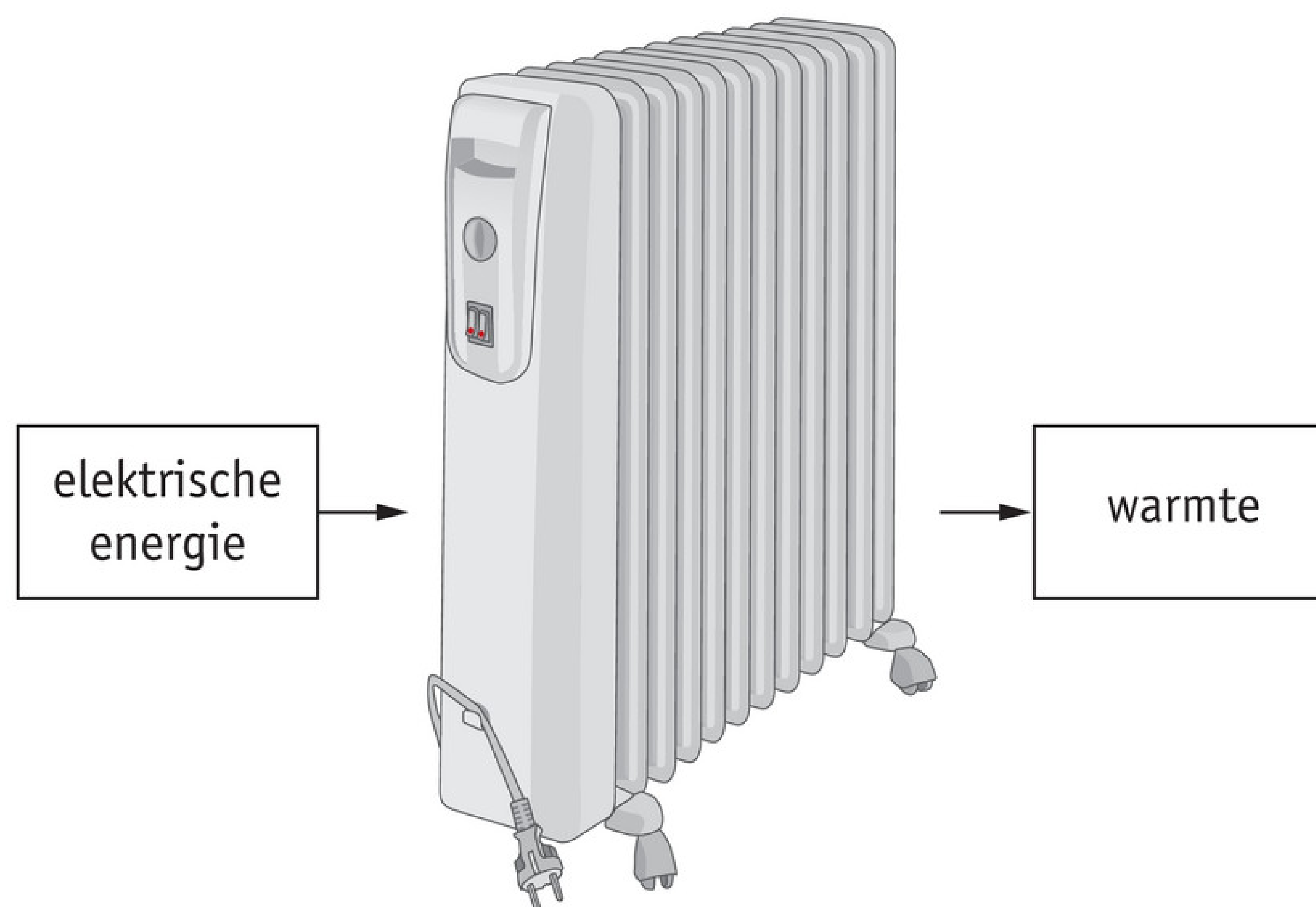
## Energieoverdracht en energieomzetting

Bij **energieoverdracht** geeft het ene voorwerp zijn energie geheel of gedeeltelijk aan een ander voorwerp af. In figuur 10 zie je daar een voorbeeld van. In figuur 10a ligt biljartbal A stil en rolt biljartbal B naar biljartbal A. In figuur 10b zie je hoe na de botsing tussen de twee ballen biljartbal B stilligt en biljartbal A wegrolt. Biljartbal B heeft zijn energie overgedragen aan biljartbal A.




▲ **figuur 10** Biljartbal B draagt zijn energie over aan biljartbal A.

Bij **energieomzetting** verandert de ene energiesoort in een of meer andere energiesoorten. Zo zet een elektrische kachel elektrische energie (die de kachel ingaat) om in warmte (die de kachel uitgaat). Dat is in figuur 11 weergegeven.




▲ **figuur 11** Een kachel zet elektrische energie om in warmte.

## Wet van behoud van energie

Zowel bij overdracht als bij omzetting van energie geldt de **wet van behoud van energie**: bij alle omzettingen en overdrachten van energie blijft de totale hoeveelheid energie behouden. Dat betekent dat de energie voor de overdracht of omzetting even groot is als de totale energie na de overdracht of omzetting. Er gaat dus bij geen enkel proces energie verloren. Je schrijft dat ook wel als volgt:

$$E_{tot,in} = E_{tot,uit}$$

Hierin is:
- $E_{tot,in}$ de totale hoeveelheid energie voor de overdracht of omzetting in joule (J);
- $E_{tot,uit}$ de totale hoeveelheid energie na de overdracht of omzetting in joule (J).

In voorbeeldopgave 11 zie je hoe je met de wet van behoud van energie kunt werken.

**Voorbeeldopgave 11**

Twee biljartballen A en B hebben allebei een massa van 210 g. Bal A botst met 0,40 m s$^{-1}$ tegen bal B die beweegt met een snelheid van 0,80 m s$^{-1}$. Na de botsing heeft bal A een snelheid van 0,50 m s$^{-1}$. Bij de botsing komt $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ J warmte vrij.
Bereken de snelheid van bal B na de botsing.

*Uitwerking*
Voor de botsing hebben biljartbal A en B allebei kinetische energie.
$m_A = 210 \text{ g} = 0{,}210 \text{ kg}$
$v_{A,voor} = 0{,}40 \text{ m s}^{-1}$
$m_B = 210 \text{ g} = 0{,}210 \text{ kg}$
$v_{B,voor} = 0{,}80 \text{ m s}^{-1}$
Er geldt:
$E_{tot,in} = E_{kA,voor} + E_{kB,voor}$
$E_{tot,in} = ½ \cdot m_A \cdot v^2_{A,voor} + ½ \cdot m_B \cdot v^2_{B,voor}$
$E_{tot,in} = ½ \times 0{,}210 \times 0{,}40^2 + ½ \times 0{,}210 \times 0{,}80^2 = 8{,}4 \cdot 10^{-2} \text{ J}$

Na de botsing hebben bal A en B nog steeds allebei kinetische energie en is er warmte vrijgekomen.
Er geldt:
$E_{tot,uit} = E_{kA,na} + E_{kB,na} + Q$
$E_{tot,uit} = ½ \cdot m_A \cdot v^2_{A,na} + ½ \cdot m_B \cdot v^2_{B,na} + Q$
$E_{tot,uit} = ½ \cdot 0{,}210 \cdot 0{,}50^2 + ½ \cdot 0{,}210 \cdot v^2_{B,na} + 4{,}5 \cdot 10^{-3}$
$E_{tot,uit} = 3{,}075 \cdot 10^{-2} + 0{,}105 \cdot v^2_{B,na}$
Pas de wet van behoud van energie toe: $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$
$8{,}4 \cdot 10^{-2} = 3{,}075 \cdot 10^{-2} + 0{,}105 \cdot v^2_{B,na}$
Hieruit volgt: $0{,}105 \cdot {v_{B,na}}^2 = 8{,}4 \cdot 10^{-2} - 3{,}075 \cdot 10^{-2} = 5{,}325 \cdot 10^{-2}$, waaruit ten slotte volgt:

$$v_{B,na} = \sqrt{\frac{5{,}325 \cdot 10^{-2}}{0{,}105}} = 0{,}71 \text{ m s}^{-1}$$

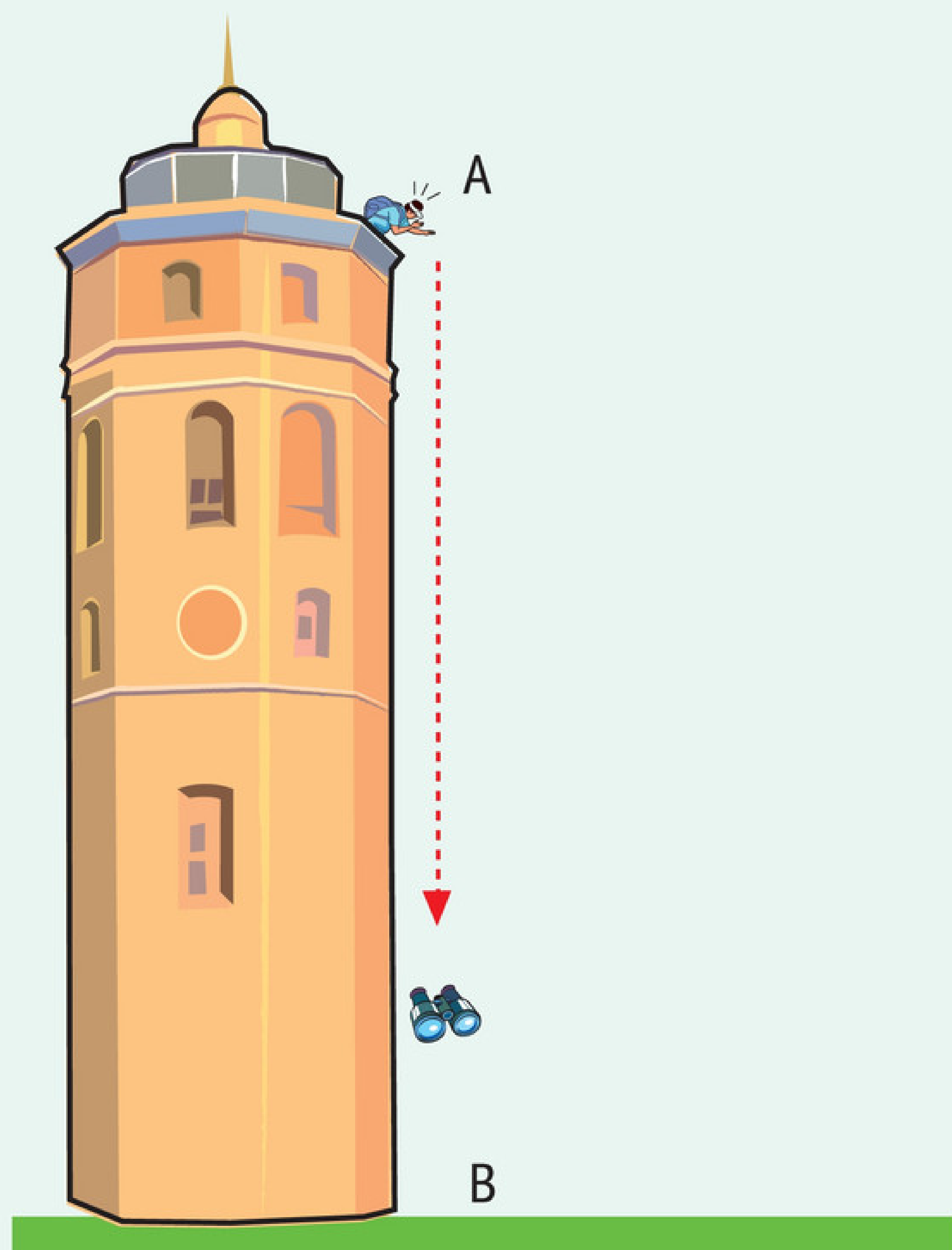
Omdat de wet van behoud van energie voor alle processen geldt, kun je ook zeggen dat de totale energie in de natuur altijd even groot is. Dit is ook de wet van behoud van energie, maar nu op grotere schaal. Omdat er zich oneindig veel processen tegelijkertijd afspelen in de natuur, is het niet mogelijk de wet van behoud van energie in deze vorm te bewijzen. Toch twijfelt geen enkele natuurkundige eraan.

Bij veel energieomzettingen wordt kinetische energie omgezet in zwaarte-energie en omgekeerd. Dit is bijvoorbeeld het geval als een voorwerp een vrije val uitvoert of als je een voorwerp omhoog, omlaag of horizontaal gooit of onder een bepaalde hoek. Als je de wrijvingskrachten kunt verwaarlozen, spelen alleen kinetische energie en zwaarte-energie een rol. Ook in deze situaties kun je de wet van behoud van energie $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$ toepassen. Dat zie je in voorbeeldopgaven 12 en 13.

**Voorbeeldopgave 12**
Een toerist verliest zijn verrekijker vanaf een 80 m hoge uitkijktoren.
**a** Bereken met welke snelheid de verrekijker de grond bereikt. Verwaarloos de luchtwrijving.
**b** Waar blijft de energie bij de botsing van de verrekijker met de grond?

*Uitwerking*
**a** Noem het beginpunt van de val van de verrekijker boven op de toren A en het eindpunt van deze val op de grond B (figuur 12).

Op het moment dat de verrekijker begint te vallen, heeft deze zwaarte-energie (de kijker bevindt zich op 80 m hoogte) en nog geen kinetische energie (want de kijker begint met snelheid 0 m $s^{-1}$ aan de val).
$h_A = 80$ m
$g = 9{,}81$ m $s^{-2}$




◀ **figuur 12** Een toerist verliest zijn verrekijker.

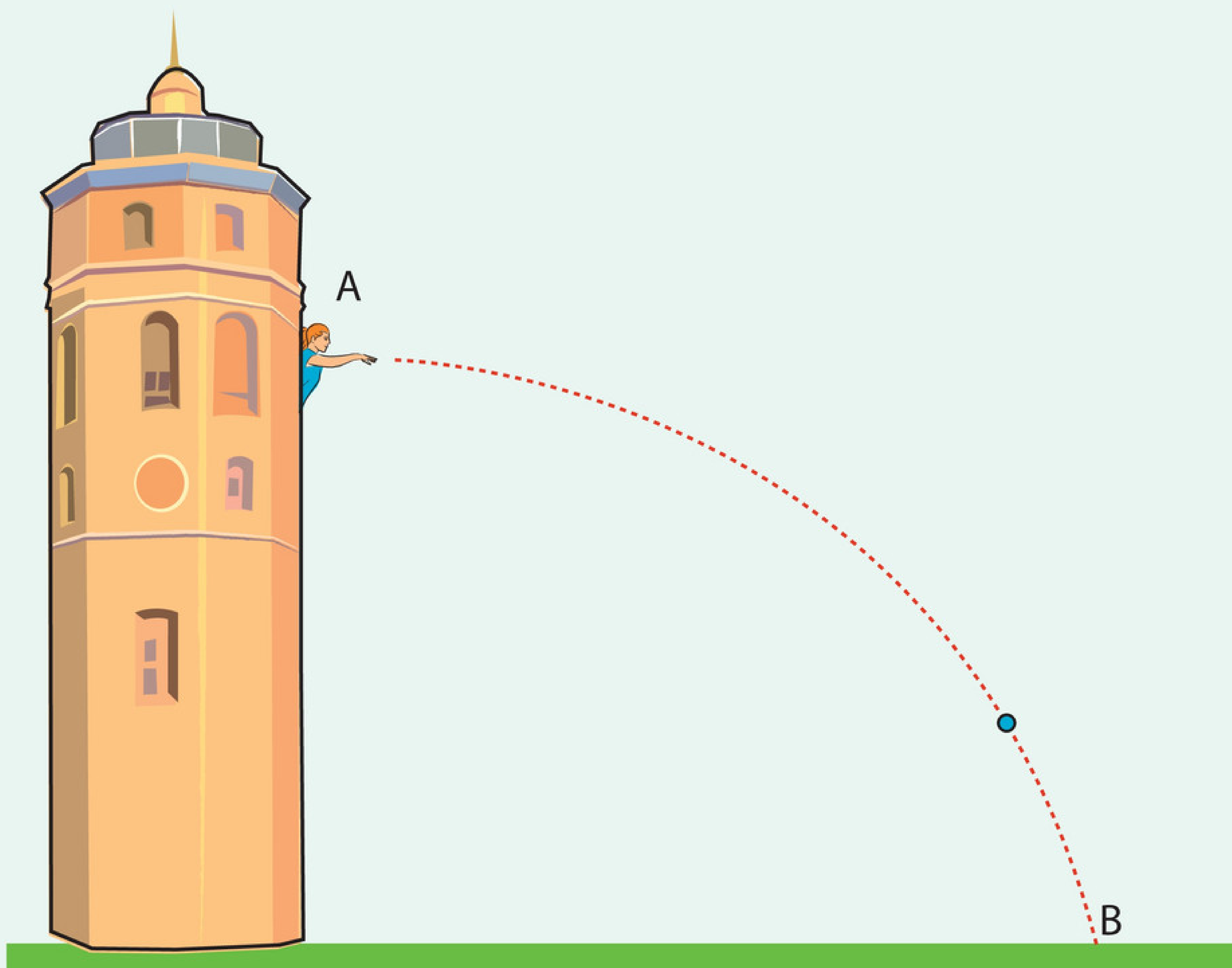
Er geldt dus:
$E_{tot,in} = m \cdot g \cdot h_A = m \cdot 9{,}81 \cdot 80 = 784{,}8 \cdot m$
Op het moment waarop de verrekijker de grond bereikt, heeft de kijker geen zwaarte-energie meer ($h = 0$ m, dus $E_z = 0$ J), maar alleen nog kinetische energie.
Er geldt: $E_{tot,uit} = E_{kB} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$
Pas de wet van behoud van energie toe: $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$
$784{,}4 \cdot m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$
Links en rechts delen door $m$ geeft: $784{,}4 = \frac{1}{2} \cdot v_B^2$ ofwel: $1569{,}6 = v_B^2$
Daaruit volgt: $v_B = \sqrt{1569{,}6} = 40$ m $s^{-1}$
Opmerking: je ziet dat de massa van de verrekijker niet van invloed is.
**b** Na de botsing met de grond lijkt alle energie te zijn verdwenen. Maar dat kan natuurlijk niet volgens de wet van behoud van energie. Bij de botsing met de grond wordt de kinetische energie van de verrekijker omgezet in warmte $Q$. De hoeveelheid warmte die bij de botsing ontstaat, is even groot als de kinetische energie van de verrekijker bij de botsing met de grond (en die is weer even groot als de zwaarte-energie van de verrekijker op het moment dat de val ervan begon). Om deze hoeveelheid warmte uit te rekenen, heb je de massa van de verrekijker nodig.

**Voorbeeldopgave 13**

Annet staat op een 10 m hoge toren. Ze gooit een tennisbal met een snelheid van 6,0 m $s^{-1}$ weg in horizontale richting.
Bereken de snelheid waarmee de tennisbal de grond raakt. Verwaarloos de luchtwrijving.

*Uitwerking*
Geef het punt waarop de bal wordt weggegooid aan met de letter A en het punt waar de bal de grond bereikt met punt B (figuur 13).

Op het moment van gooien heeft de tennisbal zowel zwaarte-energie (hij bevindt zich op 10 m hoogte) als kinetische energie (hij heeft een snelheid van 6,0 m $s^{-1}$).
$h_A = 10$ m
$v_A = 6{,}0$ m $s^{-1}$




◀ **figuur 13** Annet gooit een tennisbal horizontaal weg van een toren.

Er geldt:
$E_{tot,in} = E_{k,A} + E_{z,A}$
$E_{tot,in} = ½ \cdot m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot h_A$
$E_{tot,in} = ½ \cdot m \cdot 6{,}0^2 + m \cdot 9{,}81 \cdot 10$
$E_{tot,in} = 18 \cdot m + 98{,}1 \cdot m = 116{,}1 \cdot m$
Op het moment dat de bal de grond raakt, heeft hij geen zwaarte-energie meer ($h_B = 0$ m, dus $E_{z,B} = 0$ J), maar alleen nog kinetische energie.
Er geldt: $E_{tot,uit} = E_{k,B} = ½ \cdot m \cdot v_B^2$
Pas de wet van behoud van energie toe: $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$
$116{,}1 \cdot m = ½ \cdot m \cdot v_B^2$
Links en rechts door $m$ delen geeft: $116{,}1 = ½ \cdot v_B^2$ ofwel: $232{,}2 = v_B^2$
Daaruit volgt: $v_B = 15$ m $s^{-1}$
De tennisbal komt dus met 15 m $s^{-1}$ neer.

*Opmerkingen*
- De richting waarin de tennisbal wordt weggegooid, is niet van belang. Ook als de tennisbal omlaag, omhoog of schuin wordt weggegooid met een snelheid van 6,0 m $s^{-1}$, komt hij op de grond met een snelheid van 15 m $s^{-1}$, want de totale energie bij het weggooien is even groot als in voorbeeldopgave 13 en dus is de totale energie bij het neerkomen ook even groot.
- Ook in deze voorbeeldopgave is de massa van de tennisbal niet van invloed.

## Wrijvingsarbeid

Als wrijving optreedt, moet je behalve met zwaarte-energieën en kinetische energieën ook rekening houden met de wrijvingsarbeid. In die gevallen wordt energie namelijk ook omgezet in warmte. De hoeveelheid warmte die ontstaat, is gelijk aan de **wrijvingsarbeid**. Dat is de arbeid die de wrijvingskracht $W_{Fw}$ verricht met weglating van het minteken (want die arbeid is negatief, omdat de wrijvingskracht tegengesteld werkt aan de verplaatsingsrichting).
Er geldt dus:

$$Q = F_w \cdot s$$

Hierin is:
- $Q$ de ontstane warmte in joule (J);
- $F_w$ de grootte van de wrijvingskracht in newton (N);
- $s$ de verplaatsing in meter (m).

Als wrijving optreedt, kun je de wet van behoud van energie toepassen, maar je mag de ontstane warmte dan niet vergeten. Hoe je dat doet, zie je in voorbeeldopgave 14.

**Voorbeeldopgave 14**

Een steen van 57 g valt van een toren van 150 m hoogte.
Bereken met de wet van behoud van energie de snelheid waarmee de steen de grond bereikt.
De gemiddelde luchtwrijving is 0,020 N.

*Uitwerking*
Noem het beginpunt van de val van de steen boven op de toren A en het eindpunt van deze val op de grond B.
$m = 57 \text{ g} = 0{,}057 \text{ kg}$
$h_A = 150 \text{ m}$
$F_w = 0{,}020 \text{ N}$
$E_{tot,in} = E_{z,A} = m \cdot g \cdot h_A = 0{,}057 \times 9{,}81 \times 150 = 83{,}8755 \text{ J}$ (tussenresultaat, dus het aantal significante cijfers is niet belangrijk)
$E_{tot,uit} = E_{k,B} + Q$
$E_{tot,uit} = ½ \cdot m \cdot v_B^2 + F_w \cdot s$
$E_{tot,uit} = ½ \cdot 0{,}057 \cdot v_B^2 + 0{,}020 \times 150$ (let op: geen minteken bij 0,020 × 150)
$E_{tot,uit} = 0{,}0285 \cdot v_B^2 + 3{,}0$
Pas de wet van behoud van energie toe: $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$
$83{,}8755 = 0{,}0285 \cdot v_B^2 + 3{,}0$
Hieruit volgt: $0{,}0285 \cdot v_B^2 = 83{,}8755 - 3{,}0 = 80{,}8755$

Dat levert $v_B = \sqrt{80{,}8755} = 9{,}0 \text{ m s}^{-1}$

De steen komt dus met 9,0 m s$^{-1}$ neer.
In dit voorbeeld kun je de massa dus niet links en rechts weg delen. Je had deze voorbeeldopgave overigens ook kunnen oplossen met de WAK (probeer dat zelf).

## Onthoud!

- Bij de overdracht van energie geeft het ene voorwerp zijn energie geheel of gedeeltelijk af aan een ander voorwerp.
- Een apparaat dat energie omzet, verandert de ene energiesoort in een of meer andere energiesoorten.
- Bij alle overdrachten en omzettingen van energie blijft de totale hoeveelheid energie behouden. Dit is de wet van behoud van energie: $E_{tot,in} = E_{tot,uit}$
- Door wrijvingskrachten ontstaat warmte. De hoeveelheid warmte die ontstaat, is gelijk aan de wrijvingsarbeid zonder minteken: $Q = F_w \cdot s$

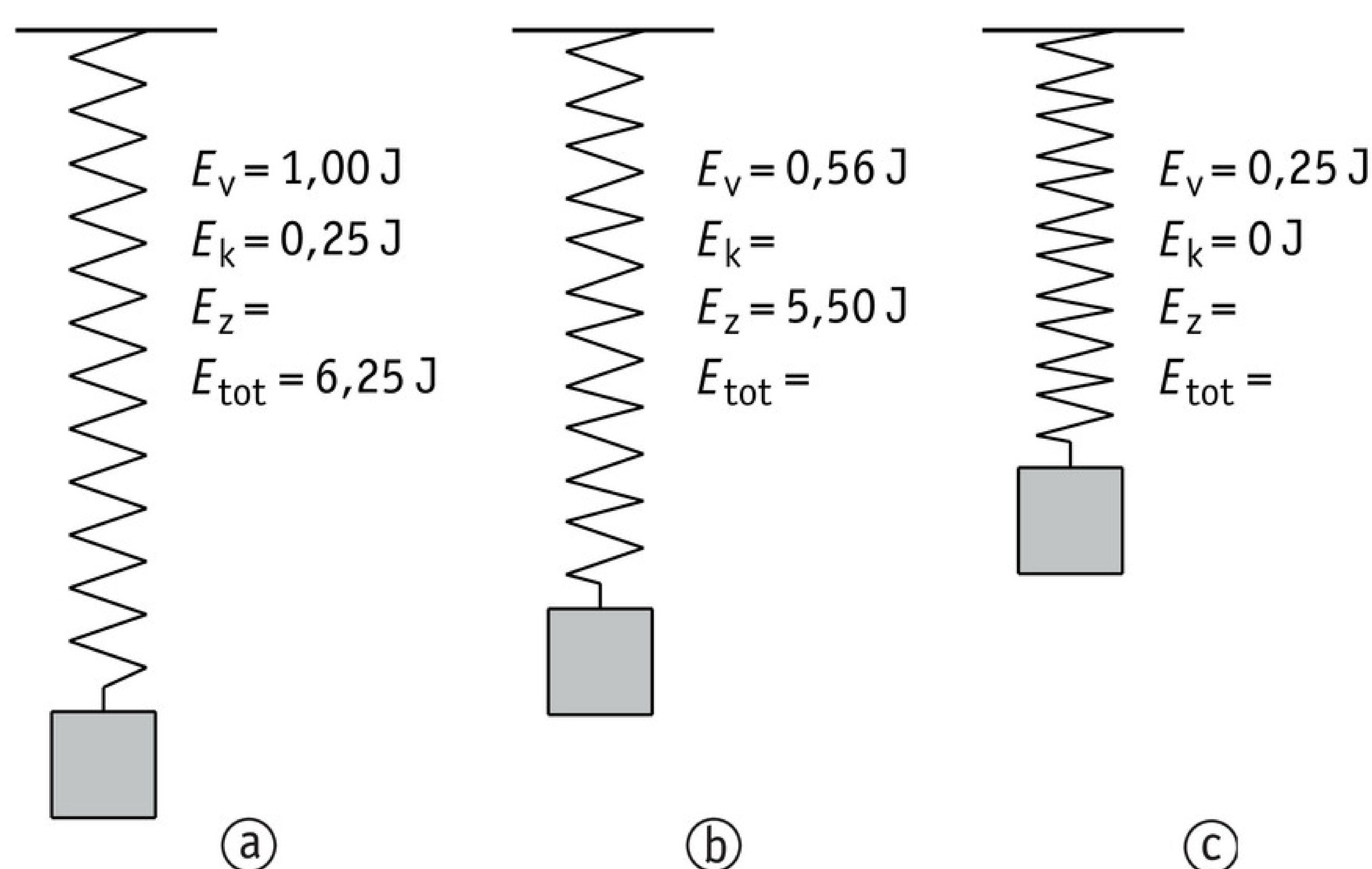
## Opdrachten

**35** Overdracht en omzetting van energie
Maak de volgende opdrachten.
- **a** Leg uit wat wordt bedoeld met de overdracht van energie.
- **b** Leg uit wat wordt bedoeld met de omzetting van energie.
- **c** Hoe luidt de wet van behoud van energie?
- **d** Wat wordt verstaan onder wrijvingsarbeid?
- **e** Hoe bereken je de warmte die ontstaat door de wrijvingskracht?

**36** Energieomzettingen
Welke energieomzetting vindt plaats als:
- **a** een auto gaat rijden over een horizontale weg?
- **b** een trampolinespringer omhoog veert en loskomt van de trampoline?
- **c** een lucifer wordt aangestoken?
- **d** een bal een helling af rolt?

**37** Radiografische auto
Leg uit welke energieoverdrachten en -omzettingen er achtereenvolgens plaatsvinden als een radiografisch bestuurbare auto (op batterijen) gaat rijden.

**38** Trillend blokje
Een blokje aan een veer trilt op en neer, waardoor er voortdurend energieomzettingen plaatsvinden. Het blokje dat aan de veer hangt en trilt, bezit drie soorten energie: veer-energie ($E_v$), kinetische energie ($E_k$) en zwaarte-energie ($E_z$). De totale energie van het blokje wordt $E_{tot}$ genoemd (figuur 14).




▲ **figuur 14** energieomzettingen bij een trillend blokje

Noteer de ontbrekende getallen en leg uit hoe je aan deze getallen bent gekomen. Verwaarloos de wrijving.

**39** Omhooggeschoten kogel

Een kogel van 300 g wordt omhooggeschoten met een snelheid van 40 m s$^{-1}$.
Bereken de maximale hoogte die de kogel bereikt als:

**a** de luchtwrijving te verwaarlozen is.
**b** de luchtwrijving gemiddeld 0,60 N bedraagt.

**40** Energieopwekking bij een stuwmeer

Bij de Chinese Drieklovendam staat het water in het stuwmeer aan de ene kant van de damwand 110 m hoger dan aan de andere kant van de damwand. Ga ervan uit dat het water bij de opwekking van elektriciteit recht omlaag valt.

**a** Bereken met de wet van behoud van energie de snelheid die het water heeft na deze val van 110 m.
**b** Vergelijk je antwoord op opdracht a met het antwoord op opdracht 30.

**41** Kogel dringt door in hout

Een kogel van 10 g heeft een snelheid van 300 m s$^{-1}$. De kogel dringt in een blok hout van 2740 g. Het geheel krijgt een snelheid van 1,50 m s$^{-1}$.

**a** Bereken hoeveel warmte er vrijkomt als de kogel het blok hout binnendringt.
**b** De kogel dringt 14 cm door in het blok hout.
Bereken de remkracht die de kogel van het hout ondervindt.

**42** Knikkers

Hermke staat op een 20,0 m hoog gebouw met vier knikkers. Verwaarloos in deze opdracht de wrijving.

**a** Hermke laat een knikker vallen.
Bereken de snelheid waarmee de knikker de grond raakt.
**b** Hermke gooit de tweede knikker met 4,00 m s$^{-1}$ omhoog.
Bereken de snelheid waarmee de knikker de grond raakt.
**c** Hermke gooit de derde knikker met 4,00 m s$^{-1}$ omlaag.
Bereken de snelheid waarmee de knikker de grond raakt.
**d** Hermke gooit de vierde knikker met 4,00 m s$^{-1}$ horizontaal weg.
Bereken de snelheid waarmee deze knikker de grond raakt.

**43** Veer en vulling van een pen

Marijne haalt een pen uit elkaar. Ze duwt de vulling in de veer, drukt de veer in en laat deze dan los. Daarop vliegt de 7,0 g zware vulling 30 cm recht omhoog en de 3,0 g zware veer vliegt 10 cm recht omhoog (figuur 15).



▶ **figuur 15** De vulling en de veer vliegen omhoog.

**a** Bereken hoeveel veerenergie er voor het wegschieten aanwezig was.
**b** Hoeveel arbeid heeft Marijne verricht bij het indrukken van de veer?

**44** Model van een vrije val
Een kogel wordt van een bepaalde hoogte losgelaten. Het volgende model van deze val kan de snelheid van de vallende kogel tekenen als functie van de hoogte.
**a** Van welke hoogte wordt het voorwerp losgelaten?
**b** Leg uit wat het getal 19 620 voorstelt in de derde modelregel. Laat zien dat dit getal overeenkomt met de gegeven startwaarden en constanten.
**c** Leg uit dat dit model gebruikmaakt van de wet van behoud van energie.
**d** Leg de vierde modelregel uit.
**e** Reken de eerste drie rekenslagen van het model door.
**f** Het model is niet af. Bij het gegeven model blijft de computer in principe altijd maar doorrekenen.
Pas het model aan zodat de computer stopt als de kogel de grond raakt.

| modelregels | startwaarden en constanten |
|---|---|
| h = h – dh<br>Ez = m*g*h<br>Ek = 19620 – Ez<br>v = sqrt (2*Ek/m) | h = 1,0E3<br>dh = 1,0<br>v = 0<br>g = 9,81<br>m = 2,0 |

**+45** Loodkorrels
Een koker met 50 loodkorrels van elk 20 g wordt 72 keer snel omgedraaid. Elke keer vallen de loodkorrels gemiddeld 80 cm naar beneden. Na 72 keer draaien is de temperatuur van de loodkorrels in de buis gestegen van 20,3 °C tot 24,4 °C. Ga ervan uit dat de korrels tijdens de val geen wrijving ondervinden en dat alle warmte naar de loodkorrels gaat.
**a** Bereken uit deze gegevens de soortelijke warmte van lood.
**b** Zoek de soortelijke warmte van lood op in Binas en vergelijk de waarde die je in opdracht a hebt berekend met de gegeven waarde.
**c** Zou de uitkomst van opdracht a anders zijn geweest als de korrels lood geen 20 g maar 25 g hadden gewogen?
**d** In werkelijkheid komt niet alle warmte ten goede aan de loodkorrels, maar stijgen ook de koker en de lucht in de koker een beetje in temperatuur.
Leg uit waarom hierdoor de bij opdracht a berekende soortelijke warmte van lood te groot is.

# 5 Vermogen

In deze paragraaf leer je:
- de grootheid vermogen kennen;
- het vermogen op drie manieren berekenen.

De motor in een gemiddelde personenauto kan 30 000 J arbeid verrichten. Ook het motortje in een radiografische auto op batterijen kan 30 000 J arbeid verrichten (figuur 16). Beide motoren kunnen deze arbeid niet in dezelfde tijd leveren. De motor in een personenauto doet dat in ongeveer 0,40 s. De motor in de radiografische auto heeft daar een uur voor nodig. Om de twee motoren beter met elkaar te kunnen vergelijken, is de grootheid vermogen ingevoerd.



▲ **figuur 16** een personenauto en een radiografisch bestuurde auto

## De grootheid vermogen

Het **vermogen *P*** van een apparaat dat arbeid verricht, is de arbeid die per seconde wordt verricht. Je kunt het vermogen berekenen met de formule:

$$P = \frac{W}{t}$$

Hierin is:

- $P$ het vermogen in joule per seconde (J $s^{-1}$); dit wordt watt (W) genoemd;
- $W$ de verrichte arbeid in joule (J);
- $t$ de tijdsduur waarin deze arbeid werd verricht in seconde (s).

Je kunt met deze formule ook het vermogen uitrekenen van een mens die arbeid verricht. Dat zie je in voorbeeldopgave 15.

**Voorbeeldopgave 15**

Een gewichtheffer tilt in 2,4 s een halter van 80 kg met constante snelheid 2,3 m omhoog. Bereken het vermogen dat de gewichtheffer hiervoor moet leveren.

*Uitwerking*
$m$ = 80 kg
$g$ = 9,81 m $s^{-2}$
$s$ = 2,3 m
$t$ = 2,4 s
Doordat de halter met constante snelheid wordt opgetild, geldt:
$F_{spier} = F_z = m \cdot g = 80 \times 9{,}81 = 785$ N.
$W = F_{spier} \cdot s = 785 \times 2{,}3 = 1{,}81 \cdot 10^3$ J

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1{,}81 \cdot 10^3}{2{,}4} = 75 \cdot 10^2 \text{ W}$$

Er zijn veel apparaten die geen arbeid verrichten en niets verplaatsen, maar wel een vermogen hebben, zoals een broodrooster, een lamp en een eierwekker. Deze apparaten zetten energie om. Voor het vermogen van energieomzetters geldt een andere definitie: het vermogen is de energie die een apparaat per seconde omzet. Je kunt het vermogen berekenen met de volgende formule:

$$P = \frac{E}{t}$$

Hierin is:
- $P$ het vermogen in joule per seconde (J $s^{-1}$); dit wordt watt (W) genoemd;
- $E$ de omgezette energie in joule (J);
- $t$ de tijdsduur waarin deze energie wordt omgezet in seconde (s).

Je kunt de omgezette energie of arbeid behalve in joule ook uitdrukken in kilowattuur (kWh). Je moet dan in de twee formules voor het vermogen de tijd uitdrukken in uur (h) en het vermogen in kilowatt (kW).

## Nog een formule voor vermogen

Van voorwerpen die een constante snelheid hebben, is het vermogen ook op een andere manier uit te rekenen. Er geldt dan:

$W = F \cdot s$ [formule 1]

Hierin is $F$ de voortstuwende kracht, dus de kracht van de motor, de wind of de spierkracht. $F$ is in deze formule de kracht die de beweging veroorzaakt en niet de tegenwerkende kracht. Voor het vermogen geldt:

$P = \frac{W}{t}$ [formule 2]

Als je formule 1 invult in formule 2, krijg je: $P = \frac{F \cdot s}{t}$
Hiervan kun je maken:

$P = F \cdot \frac{s}{t}$ [formule 3]

In hoofdstuk 1 heb je geleerd dat:

$v = \frac{s}{t}$ [formule 4]

Met behulp van formule 4 gaat formule 3 over in:

$$P = F \cdot v$$

Hierin is:
- $P$ het geleverde vermogen in watt (W);
- $F$ de voortstuwende kracht in newton (N);
- $v$ de snelheid in meter per seconde (m $s^{-1}$).

Je gebruikt deze formules meestal bij vervoermiddelen zoals auto's, fietsen, boten en vliegtuigen. Soms is in een opdracht niet de voortstuwende kracht gegeven, maar de tegenwerkende kracht. Als de snelheid constant is, is de voortstuwende kracht echter gelijk aan de tegenwerkende kracht. Omdat de snelheid constant is, moet de versnelling wel nul zijn en daarmee de resulterende kracht ook.

**Voorbeeldopgave 16**

Jeanette heeft een fietstocht gemaakt met een constante snelheid van 7,75 m $s^{-1}$. Het vermogen waarmee ze fietst, is $1{,}5 \cdot 10^2$ W.
Bepaal de grootte van de wrijvingskracht die ze dan ondervindt.

*Uitwerking*
$P = 1{,}5 \cdot 10^2$ W
$v = 7{,}75$ m $s^{-1}$
$P = F \cdot v$ invullen geeft: $1{,}5 \cdot 10^2 = F \cdot 7{,}75$

Daaruit volgt: $F = \dfrac{1{,}5 \cdot 10^2}{7{,}75} = 19$ N

De voortstuwende kracht (trapkracht) is dus 19 N. Omdat de snelheid van Jeanette constant is, moet de resulterende kracht nul zijn. Dat betekent dat de tegenwerkende wrijvingskracht ook 19 N moet zijn.

▶ **EXPERIMENT 3** Vermogen bij traprennen

## Onthoud!

- Het vermogen is de arbeid die per seconde wordt verricht. Je rekent dit vermogen uit met de formule $P = \dfrac{W}{t}$
- Het vermogen is ook de energie die een apparaat per seconde omzet. Je rekent dit vermogen uit met de formule $P = \dfrac{E}{t}$
- Voor voorwerpen die met constante snelheid bewegen, kun je het vermogen ook uitrekenen met $P = F \cdot v$. In deze formule is $F$ de voortstuwende kracht. Bij constante snelheid is de tegenwerkende kracht even groot.

## Opdrachten

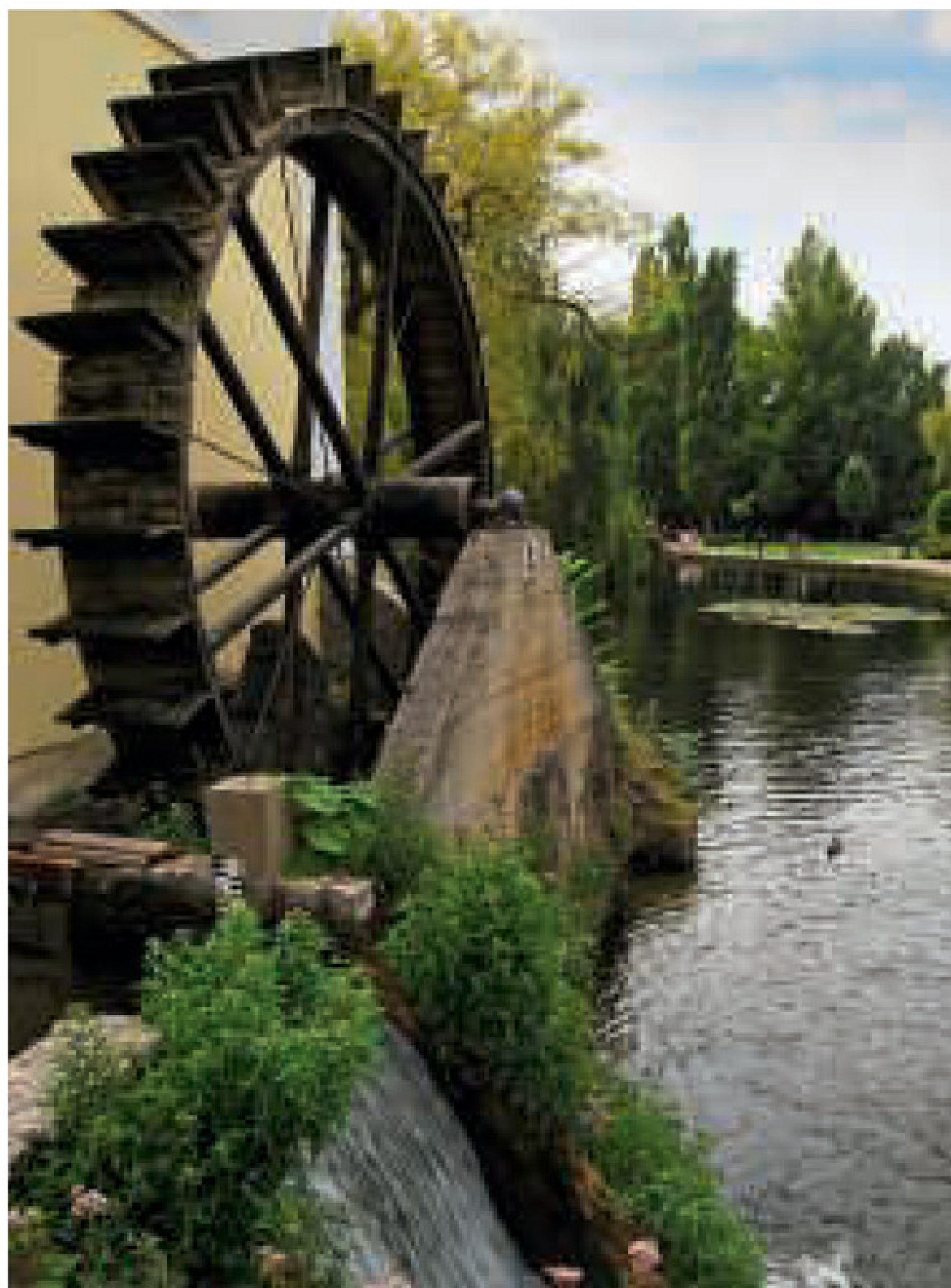
**46** Vermogen
Maak de volgende opdrachten.
**a** Geef twee definities van de grootheid vermogen.
**b** Geef de formules waarmee je het vermogen kunt uitrekenen.
**c** In welke eenheden worden de grootheden in deze formules uitgedrukt?
**d** Wat weet je over de voortstuwende kracht en de tegenwerkende kracht op een voorwerp dat met constante snelheid beweegt?

**47** Vrachtwagen laden
Bij het laden van een vrachtwagen tilt Mieke dertig zakken aardappelen van elk 20 kg 75 cm omhoog. Zij doet dat in 2,0 min.
Bereken het vermogen dat Mieke levert.

**48** Rivier
In 5,0 s stroomt er 1500 $m^3$ water op een bepaald punt door een rivier. Het water heeft een snelheid van 2,6 m $s^{-1}$.
Bereken het vermogen van dat stromende water.

**49** Eenvoudige elektriciteitscentrale

Een eenvoudige elektriciteitscentrale bestaat uit een schoepenrad in een beek die een dynamo aandrijft (figuur 17). Het water komt met een snelheid van 2,5 m $s^{-1}$ het schoepenrad binnen en verlaat het rad met 1,3 m $s^{-1}$. Elke minuut passeert 1,5 $m^3$ water het schoepenrad. Bereken het elektrisch vermogen dat de dynamo afgeeft als er geen verliezen optreden.



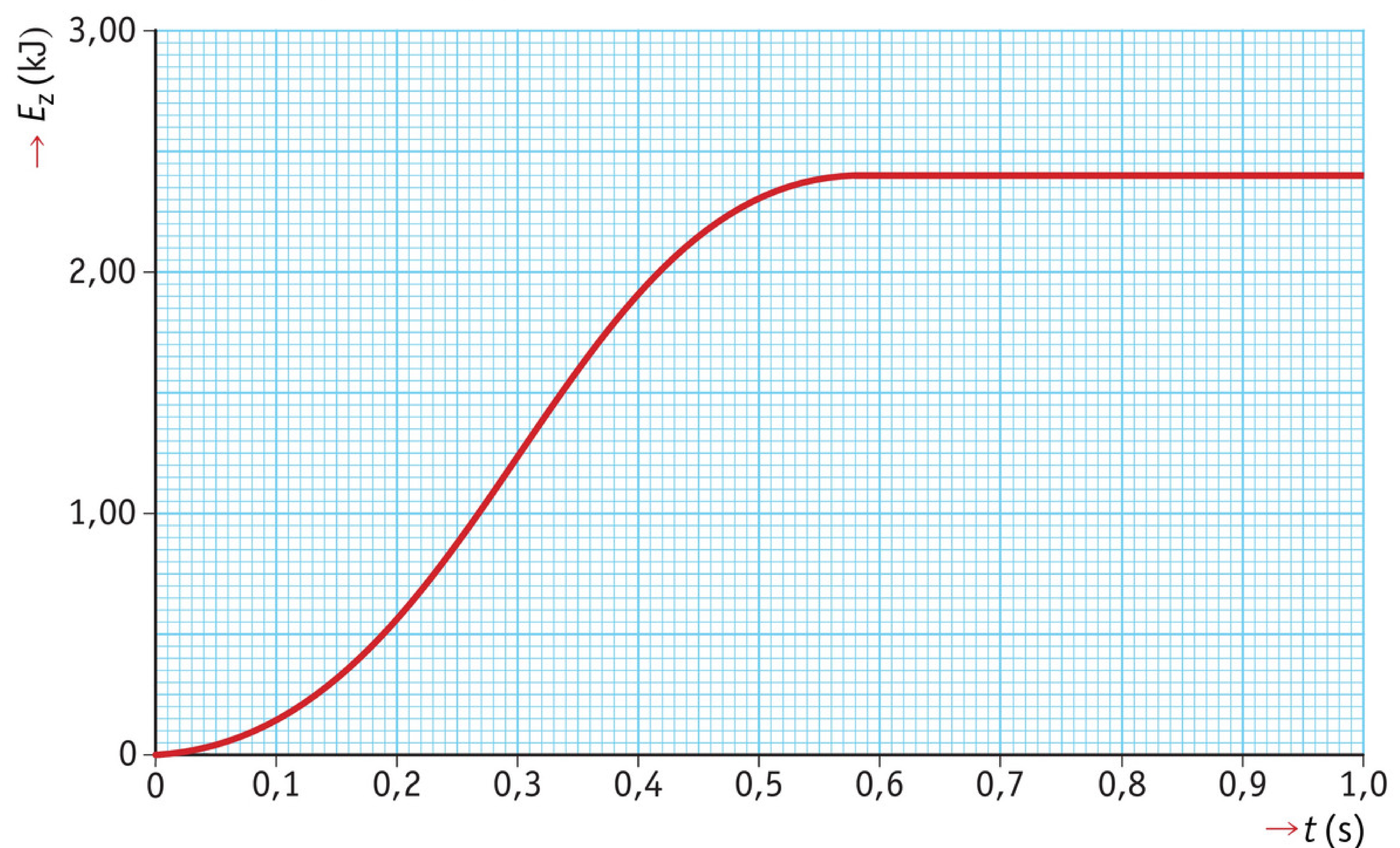
◀ **figuur 17** een schoepenrad

**50** Halter

Een halter waarmee een gewichtheffer oefent, heeft een massa van 140 kg. De gewichtheffer tilt de halter op (figuur 18). In figuur 19 is de zwaarte-energie $E_z$ van de halter ten opzichte van de grond als functie van de tijd weergegeven.



▲ **figuur 18** Een gewichtheffer tilt een halter op.




▲ **figuur 19** het ($E_z$,$t$)-diagram van de halter

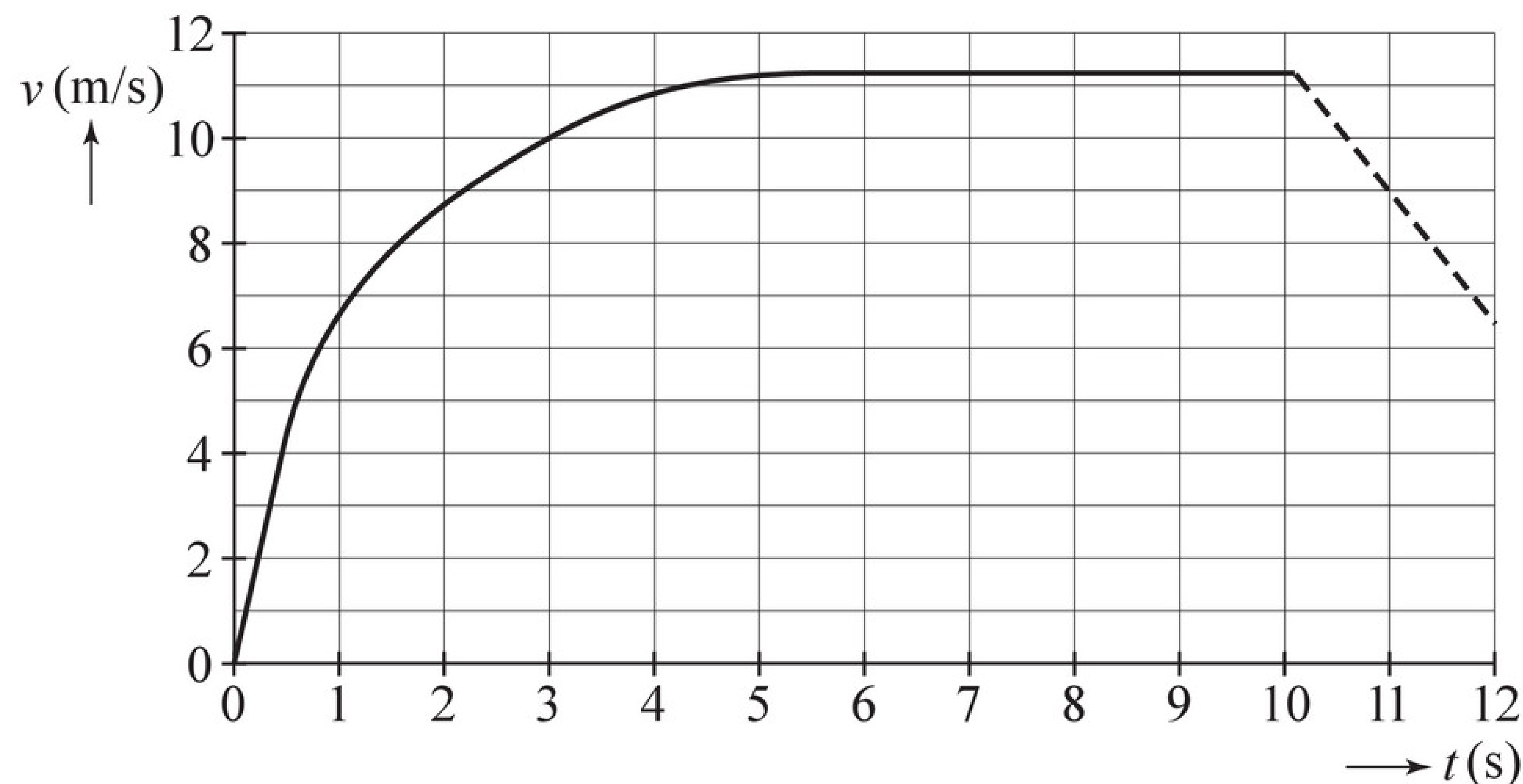
**a** Bepaal de hoogte waarover de halter wordt verplaatst.

**b** Bepaal het gemiddelde vermogen dat de gewichtheffer moet leveren tijdens het omhoogbrengen van de halter.

**c** Nadat de gewichtheffer de halter een aantal seconden omhoog heeft gehouden, gooit hij de halter in horizontale richting van zich af met een snelheid van 1,2 m $s^{-1}$. Bepaal de snelheid waarmee de halter de grond raakt.

**51** Scheepslift
De Chinese Drieklovendam in de rivier Jangtsekiang is 's werelds grootste waterkrachtcentrale en dam. Bij deze dam is ook een scheepslift gebouwd voor het vervoer van schepen tot 3000 ton. Met de lift wordt een hoogteverschil van gemiddeld 113 m overbrugd. Het omhoogbrengen van een schip van 3000 ton duurt 35 min.
**a** Bereken het vermogen dat de scheepslift hiervoor nodig heeft.
**b** Geef een reden waarom de scheepslift in werkelijkheid een groter vermogen moet leveren.

**52** Hardloper
Een hardloper rent de 100 meter sprint. Het $(v,t)$-diagram van zijn race is weergegeven in figuur 20.




▲ **figuur 20** het $(v,t)$-diagram van de race van de sprinter

In figuur 21 is het vermogen dat de spieren van de sprinter leveren (de arbeid die ze per seconde verrichten) uitgezet als functie van de tijd.




▲ **figuur 21** het $(P_{spieren},t)$-diagram van de sprinter

Tussen $t = 0$ s en $t = 3{,}0$ s is het vermogen constant. De massa van de sprinter is 80 kg.
**a** Bepaal hoeveel procent van de arbeid die de spieren tussen $t = 0$ s en $t = 3{,}0$ s verrichten, is omgezet in bewegingsenergie.
**b** Vanaf $t = 5{,}0$ s loopt de sprinter met een constante snelheid. Bij de sprinter wordt dan 33% van het geleverde vermogen gebruikt om de invloed van de wrijvingskracht te compenseren; de rest wordt gebruikt voor het versnellen en vertragen van zijn benen. Bepaal de wrijvingskracht op de sprinter vanaf $t = 5{,}0$ s.

*bron: examen 2008-I*

**53** Watertank
Bij een Afrikaans dorpje is een watertank geplaatst. In de tank is water opgeslagen. Als de tank bijna leeg is, vult een pomp de tank met grondwater. De pomp levert een vermogen van 250 W. Het water moet 7,0 m omhoog worden gepompt.
Bereken hoelang het duurt om 1,0 $m^3$ water de tank in te pompen.

*bron: examen 2008-I*

**54** Roeien

Door je met een roeiriem tegen het water af te zetten, wordt een boot voortbewogen. De roeiriem wordt daarbij als hefboom gebruikt. Tijdens een wedstrijd maakt een roeier 28 slagen per minuut. Bij elke slag verplaatst hij het handvat van de roeiriem met een gemiddelde kracht van 320 N over een afstand van 1,5 m in de richting van de kracht.

**a** Bereken de arbeid die de roeier daarbij in 1,0 min verricht.

**b** Bij een race legde de Nederlandse ‘acht met stuurman’ (figuur 22) de afstand van 2000 m af in 6 min en 40 s. In een krantenartikel stond dat elke roeier tijdens deze race een gemiddeld vermogen ontwikkelde van 450 W.
Bereken, uitgaande van deze gegevens, de gemiddelde wrijvingskracht op de boot tijdens de race.




▲ **figuur 22** acht met stuurman

## Eindopdracht

**55** Itaipu

Op de grens van Brazilië en Paraguay ligt de waterkrachtcentrale van Itaipu. De stuwdam is een van de grootste ter wereld. In de dam zijn achttien generatoren (dat zijn grote dynamo’s) aangebracht (figuur 23) die elk een elektrisch vermogen opwekken van $7{,}0 \cdot 10^5$ kW.

**a** Bereken hoeveel elektrische energie de generatoren in 24 h opwekken. Geef je antwoord in joule.

**b** In het topjaar 2000 heeft de centrale $9{,}3 \cdot 10^{10}$ kWh elektrische energie opgewekt. Reken deze elektrische energie om in joule. Gebruik Binas.



▲ **figuur 23** de waterkrachtcentrale van Itaipu

Het water dat een generator aandrijft, stroomt een pijp in met een snelheid van 8,0 m $s^{-1}$ en doorloopt een hoogteverschil van 120 m (figuur 24). Per seconde stroomt er 690 $m^3$ water de pijp in. Aan het einde van de pijp drijft het water een schoepenrad aan.

**c** Toon aan dat er per seconde $6{,}89 \cdot 10^5$ kg water de pijp in stroomt.

**d** Bereken de kinetische energie van deze hoeveelheid water op het moment dat deze de pijp in stroomt.

**e** Bereken de snelheid van deze hoeveelheid water na de val over 120 m. Verwaarloos de wrijving.

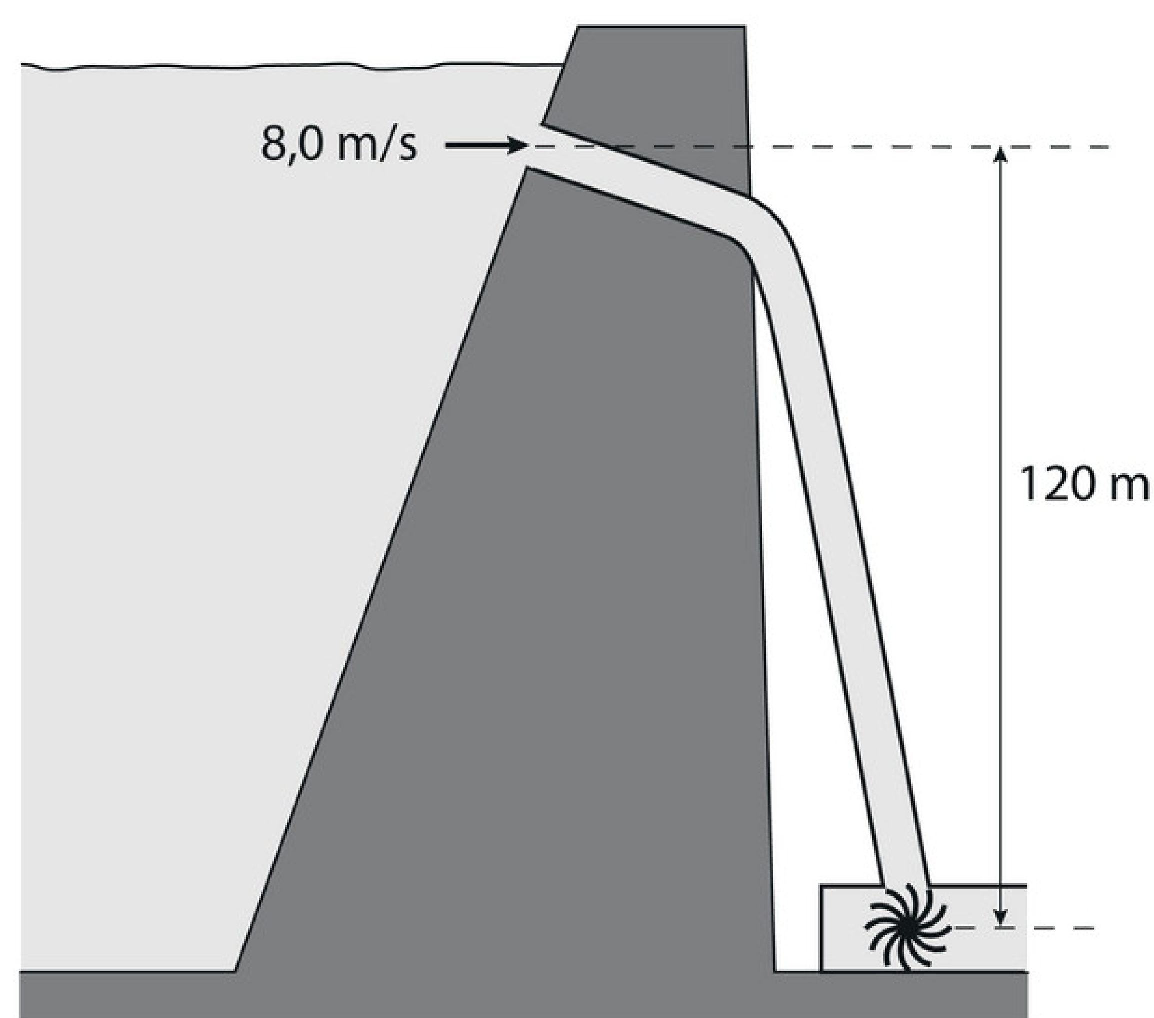
Na de val drijft het water een schoepenrad aan. De snelheid van het water achter het schoepenrad is te verwaarlozen.

**f** Bereken het vermogen dat het schoepenrad uit het bewegende water haalt.

Het stuwmeer heeft een oppervlakte van $8{,}2 \cdot 10^5$ km$^2$. Om het waterniveau in het stuwmeer te regelen, bevinden zich naast de dam enkele sluizen die af en toe worden geopend (zie de schuimende watermassa op de voorgrond van figuur 23). Er spuit dan per seconde $6{,}2 \cdot 10^4$ m$^3$ water de rivier in. De sluizen worden 12 uur opengezet.

**g** Bereken hoeveel millimeter het waterniveau in het stuwmeer hierdoor daalt.

*naar: examen natuurkunde-1 2006-I*




▲ **figuur 24** het verval van water in de waterkrachtcentrale van Itaipu

**Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).**

# 6 Practicum

## EXPERIMENT 1 Stuiterend balletje (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Een stuiterende tafeltennisbal verliest bij de stuit met de grond energie. Dat kun je zien, want het balletje komt na de stuit minder hoog.
In dit experiment onderzoek je het energieverlies bij het stuiteren.

**Onderzoeksvragen**
1 Hoeveel procent van zijn energie verliest een tafeltennisballetje bij het stuiteren?
2 Hangt het percentage energieverlies af van de beginhoogte?

**Benodigdheden**
tafeltennisballetje; rolmaat; statief; klem

**Uitvoering**
- Bepaal de massa van het tafeltennisballetje.
- Hang een rolmaat in een klem aan een statiefstang. Zorg dat de nul op de rolmaat zich precies op de grond bevindt.
- Laat het balletje van een hoogte $h_1$ = 1,0 m stuiteren en bepaal de hoogte $h_2$ die het balletje na de stuit bereikt.
- Voer deze meting vijf keer uit.
- Laat het balletje vijf keer van deze hoogte $h_2$ vallen en bepaal de hoogte $h_3$ die het balletje na de stuit bereikt.
- Laat het balletje vijf keer van deze hoogte $h_3$ vallen en bepaal de hoogte $h_4$ die het balletje na de stuit bereikt.
- Laat het balletje vijf keer van deze hoogte $h_4$ vallen en bepaal de hoogte $h_5$ die het balletje na de stuit bereikt.

**Verwerking**
1 Noteer in tabel 1 de resultaten van meting 1 tot en met 5.
2 Bereken de gemiddelde waarden van $h_1$ tot en met $h_5$ en noteer de resultaten in de tabel.
3 Bereken met de gemiddelde waarden van $h_1$ tot en met $h_5$ de energieverliezen van het balletje bij het stuiten.
4 Bereken hoeveel procent het energieverlies is van het balletje bij elke stuit.
5 Eigenlijk verliest het tafeltennisballetje niet alleen energie bij de stuit op de grond. Leg dat uit.

**Conclusie**
6 Beantwoord de onderzoeksvragen.

▼ **tabel 1** de resultaten van experiment 1 geordend

| | $h_1$ (m) | $h_2$ (m) | $h_3$ (m) | $h_4$ (m) | $h_5$ (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| meting 1 | | | | | |
| meting 2 | | | | | |
| meting 3 | | | | | |
| meting 4 | | | | | |
| meting 5 | | | | | |
| gemiddelde | | | | | |

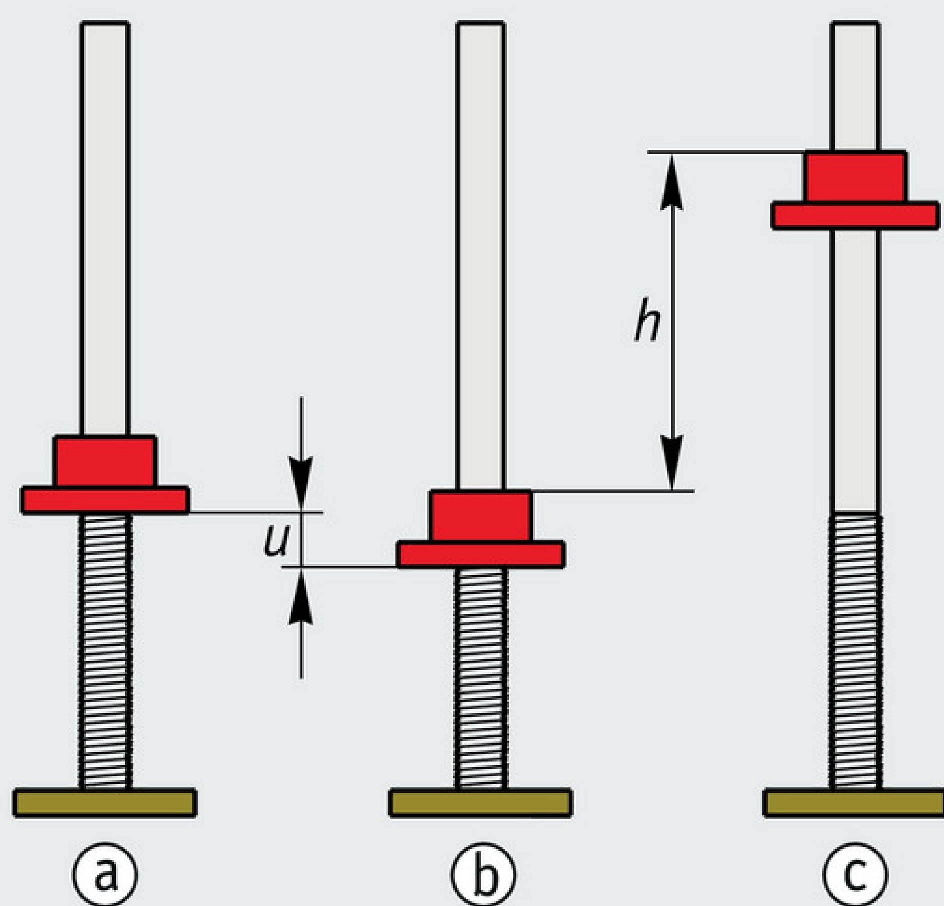
## EXPERIMENT 2 Het springend gewichtje (begripspracticum)

**Inleiding**
Als je een veer uitrekt of indrukt, bevat de veer veerenergie. Je kunt deze veerenergie gebruiken om een massa omhoog te schieten. De hoeveelheid veerenergie bepaalt hoe hoog de massa komt. De veerenergie is recht evenredig met de uitrekking of indrukking in het kwadraat.

**Onderzoeksvraag**
Is de veerenergie van een ingedrukte veer recht evenredig met het kwadraat van de indrukking?

**Benodigdheden**
statief; veer; cilindervormig gewichtje met gat in het midden; rolmaat; weegschaal

**Uitvoering**
- Bepaal de massa van het gewichtje.
- Schuif de veer over de verticale staaf van het statief. Schuif het cilindervormig gewichtje ook over de staaf en laat het rusten op de veer (figuur 25a).
- Duw het gewichtje 0,5 cm (dit is *u*) omlaag, waardoor de veer 0,5 cm wordt ingedrukt (figuur 25b).
- Laat het gewichtje los, waardoor het omhoogschiet. Meet met de rolmaat de hoogte *h* die het gewichtje bereikt (figuur 25c).
- Herhaal dit nog twee keer.




▲ **figuur 25** lanceren van het gewichtje

- Voer dit experiment ook uit voor $u$ = 1,0 cm, $u$ = 1,5 cm, $u$ = 2,0 cm en $u$ = 2,5 cm.

**Verwerking**

1. Bereken voor elke *u* de gemiddelde waarden van *h* en zet *u* en $h_{gem}$ in een overzichtelijke tabel.
2. Welke energieoverdracht en welke energieomzettingen vinden plaats bij dit experiment?
3. Leg uit dat de zwaarte-energie van het gewichtje in het hoogste punt even groot is als de oorspronkelijke veerenergie, als je de wrijving mag verwaarlozen.
4. Bereken, uitgaande van de gemiddelde waarden van *h*, de gemiddelde zwaarte-energie van het gewichtje in het hoogste punt.
5. Bereken de veerenergie van de ingedrukte veer bij de verschillende waarden van *u*, als je de wrijving mag verwaarlozen.
6. De veerenergie van een ingedrukte veer is recht evenredig met $u^2$. Controleer met een grafiek of dat bij jouw metingen klopt.

**Conclusie**

7. Beantwoord de onderzoeksvraag.

## EXPERIMENT 3 Vermogen bij traprennen (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Spierkracht kan arbeid verrichten.
In dit experiment maak je een schatting van het vermogen dat een mens kan leveren bij het oprennen van een trap.

**Onderzoeksvragen**
1. Hoe groot is het vermogen van iemand die een trap oprent?
2. Is dit nuttige vermogen groter of kleiner dan het nuttige vermogen van een auto?

**Benodigdheden**
trappenhuis; rolmaat; stopwatch; personenweegschaal

**Veiligheid**
In dit experiment ga je zo snel mogelijk een trap oprennen. Doe dit wel veilig: zorg dat het trappenhuis leeg is en pas op dat je niet valt.

**Uitvoering**
- Bepaal je massa met de personenweegschaal.
- Tel het aantal treden dat je omhoog rent.
- Meet de hoogte van één trede.
- Ren zo snel mogelijk de trap op. Meet met een stopwatch de tijd die je daarvoor nodig hebt. Probeer met een constante snelheid de trap op te rennen.

**Verwerking**

1. Bereken de totale hoogte die je omhoog gerend bent.
2. Bereken de grootte van de spierkracht toen je de trap oprende. Ga ervan uit dat je met constante snelheid omhoog gerend bent.
3. Bereken de arbeid die je spierkracht heeft geleverd. Ga ervan uit dat je alleen omhooggegaan bent en er daarbij geen horizontale verplaatsing heeft plaatsgevonden (wat in werkelijkheid niet helemaal zal kloppen).
4. Bereken het vermogen dat je hebt moeten leveren om die arbeid te verrichten.

**Conclusie**

5. Beantwoord de onderzoeksvragen.

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

## EXPERIMENT 4 Wet van arbeid en kinetische energie (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Een hangend gewichtje trekt een sleetje vooruit op een luchtkussenbaan. De spankracht in het touw waaraan het gewichtje hangt, verricht arbeid. Daardoor neemt de snelheid van het sleetje toe. De eindsnelheid van dat sleetje kun je op twee manieren berekenen: met de formule $v = \frac{s}{t}$ en met de WAK.

**Onderzoeksvraag**
Zijn de op beide manieren berekende snelheden met elkaar in overeenstemming?

## EXPERIMENT 5 Wrijvingswarmte van een karretje bepalen (apparatuurpracticum)

**Inleiding**
Als je een karretje op een helling zet, rijdt het naar beneden. Hierbij wordt de oorspronkelijk aanwezige zwaarte-energie gedeeltelijk omgezet in kinetische energie. De rest wordt door wrijving omgezet in warmte. Bij dit experiment onderzoek je hoeveel procent van de zwaarte-energie wordt omgezet in warmte. Je gebruikt hierbij een lichtpoortje om de snelheid van het karretje te meten. Zo'n lichtpoort bestaat uit een lichtbron die op een lichtsensor schijnt. Als er veel licht op de lichtsensor valt, geeft deze een grote spanning af. Als er zich een voorwerp tussen de lichtbron en de lichtsensor bevindt, valt er veel minder licht op de lichtsensor, waardoor deze een veel kleinere spanning afgeeft. Door te meten hoelang de afgegeven spanning klein is, kun je de snelheid van een passerend voorwerp berekenen.

**Onderzoeksvragen**
1 Hoeveel procent van de aanwezige zwaarte-energie wordt omgezet in warmte?
2 Hangt dit percentage af van de beginhoogte?

## ONDERZOEK Katrollen

**Inleiding**
Als je een last moet optillen, kun je dat met spierkracht doen. Je kunt daarbij een losse katrol gebruiken. Je kunt ook een vaste katrol of een combinatie van een losse en een vaste katrol gebruiken (figuur 26).Je onderzoekt of en hoe de arbeid verandert bij gebruik van katrollen.

**Onderzoeksvragen**
1 Verandert de benodigde kracht bij het ophijsen van een massa als je een vaste katrol gebruikt?
2 Verandert de benodigde kracht bij het ophijsen van een massa als je een losse katrol gebruikt?
3 Verandert de benodigde kracht bij het ophijsen van een massa als je een combinatie van een losse en een vaste katrol gebruikt?
4 Verandert de door de spierkracht verrichte arbeid bij het ophijsen van een massa als je een vaste katrol gebruikt?
5 Verandert de door de spierkracht verrichte arbeid bij het ophijsen van een massa als je een losse katrol gebruikt?
6 Verandert de door de spierkracht verrichte arbeid bij het ophijsen van een massa als je een combinatie van een vaste en een losse katrol gebruikt?

**Praktisch**
Gebruik een massablokje om op te hijsen en meet de spierkracht met een veerunster. Probeer de massa met constante snelheid op te hijsen.

**Conclusie**
Beantwoord de onderzoeksvragen.

statief statief statief
naar veerunster naar veerunster naar veerunster
m m m

▲ **figuur 26** gebruik van katrollen bij het ophijsen van een last



HOOFDSTUK 6

# Spiegels en lenzen

In het dagelijks leven maak je gebruik van spiegels, lenzen en prisma's. Je komt ze in veel optische instrumenten tegen, zoals in een beamer, fotocamera, microscoop en sterrenkijker. Al honderden jaren hebben ze hun nut bewezen. Tegenwoordig kun je bijvoorbeeld de schubben op hoofdharen die met het blote oog 'onzichtbaar' zijn, zichtbaar maken, en sterrenstelsels die vele lichtjaren ver weg staan, tot in detail projecteren op een ccd (een lichtgevoelige chip).

## Introductie



## Praktijk



## Theorie



## Maatschappij

# Wat weet je al over spiegels en lenzen?

Leerdoelen
1 Je kunt de kenmerken van positieve en negatieve lenzen uitleggen.
2 Je kunt de voorwerpsafstand en beeldafstand beschrijven.
3 Je kunt de beeldafstand van een lens bepalen door middel van een constructie met twee constructiestralen.

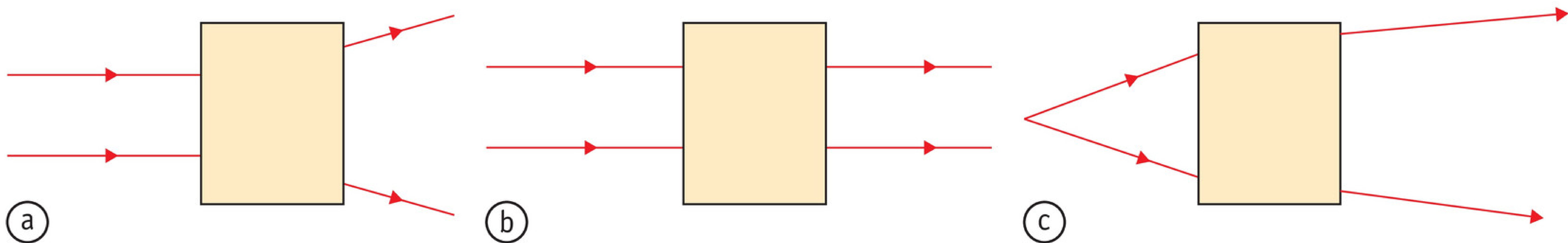
In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen over spiegels en lenzen geleerd. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

## Opdrachten voorkennis

**1** In afbeelding 1 zie je drie kokers met lichtstralen.
Combineer elke koker met het type lens dat erin zit. Trek lijnen.

A In koker a zit
B In koker b zit
C In koker c zit

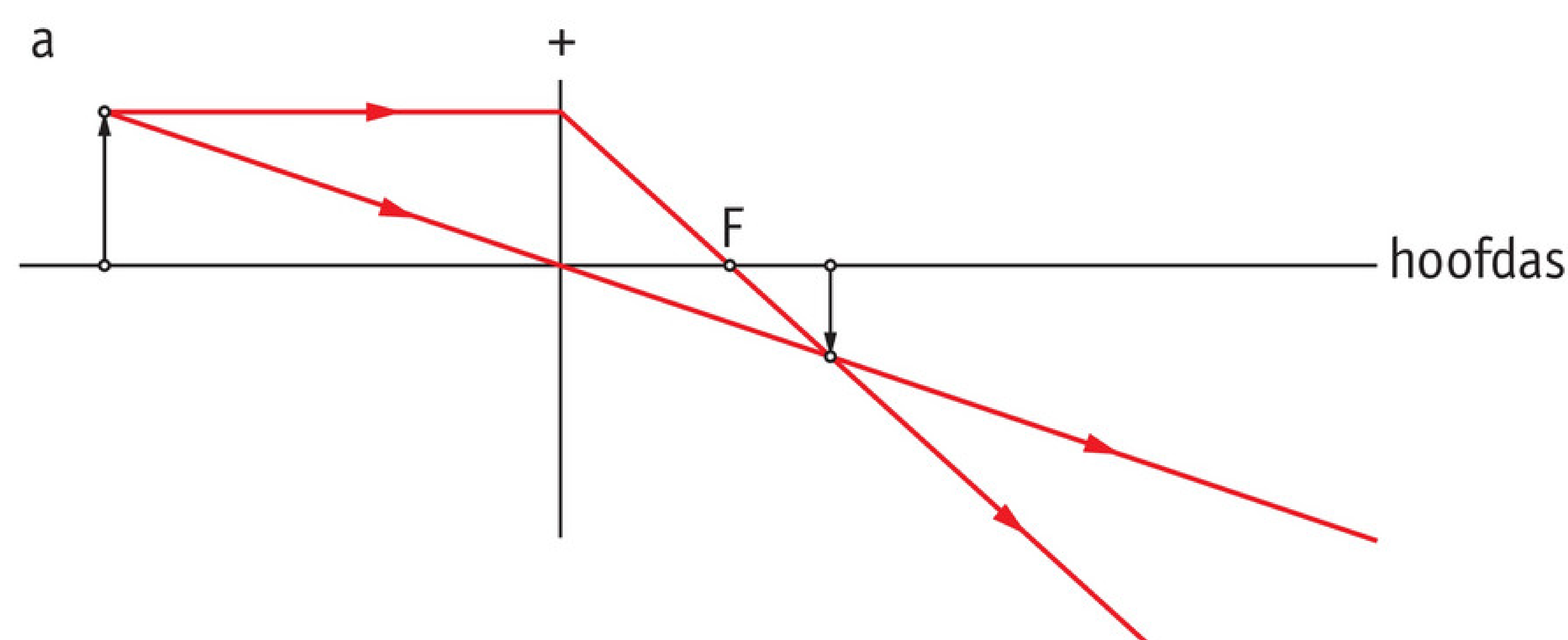
1 een bolle lens
2 een holle lens
3 geen lens




▲ **afbeelding 1**

**2** Voordat je een goede foto kunt maken, moet het beeld eerst scherp gesteld worden.
Kies de juiste woorden.
In een fotocamera is de grootte van het beeld over het algemeen *groter* / *kleiner* dan de grootte van het voorwerp.
In een fotocamera is de afstand van de lens tot het beeld over het algemeen *groter* / *kleiner* dan de afstand van de lens tot het voorwerp.

**3** Een voorwerp is met een lens scherp afgebeeld op een scherm (afbeelding 2).
Het voorwerp wordt vervolgens verder van de lens geplaatst.



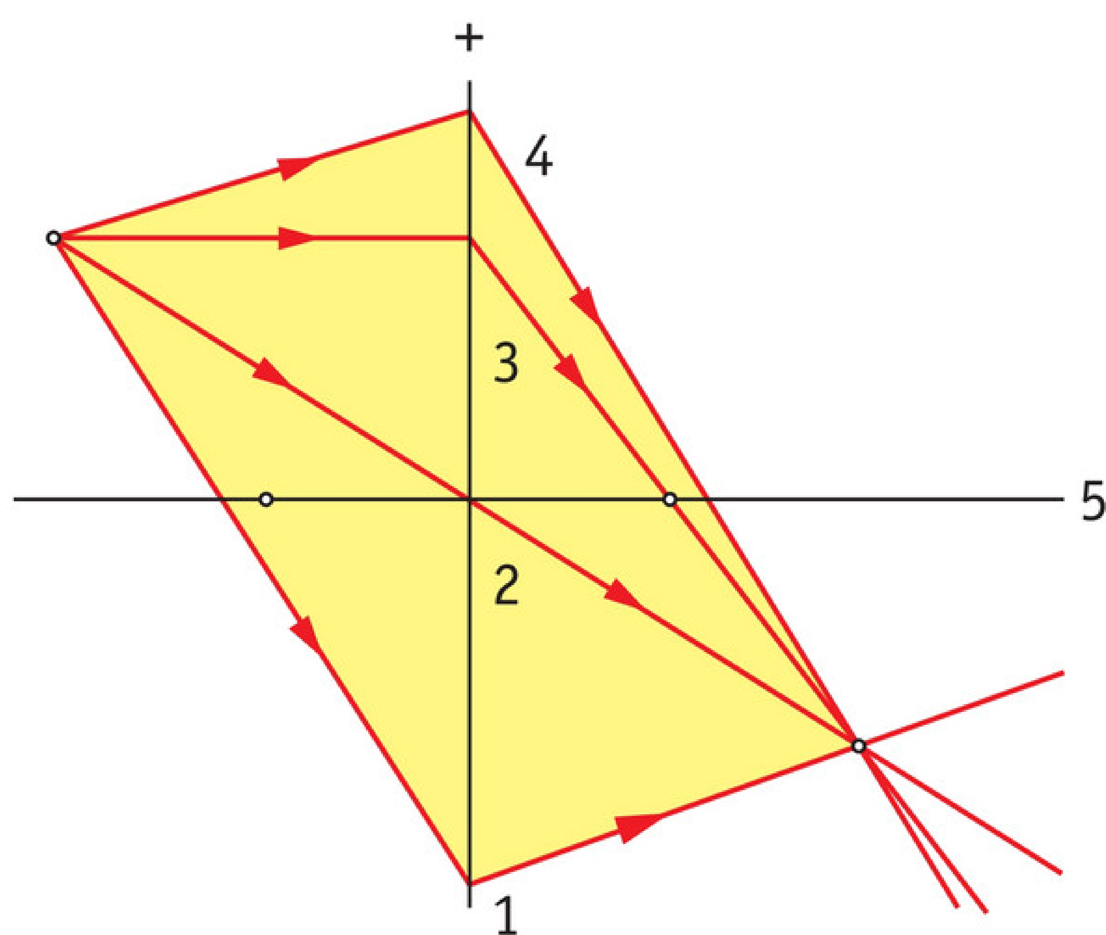

▲ **afbeelding 2**

Welke bewering over de plaats van het scherm is juist?

- ☐ A Om een scherp beeld te krijgen, moet het scherm dichter bij de lens worden geplaatst. Het gevormde beeld zal groter zijn.
- ☐ B Om een scherp beeld te krijgen, moet het scherm verder van de lens worden geplaatst. Het gevormde beeld zal groter zijn.
- ☐ C Om een scherp beeld te krijgen, moet het scherm dichter bij de lens worden geplaatst. Het gevormde beeld zal kleiner zijn.
- ☐ D Om een scherp beeld te krijgen, moet het scherm verder van de lens worden geplaatst. Het gevormde beeld zal kleiner zijn.

**4** In afbeelding 3 zijn vijf lijnen genummerd.
Welke lijnen zijn constructielijnen?

- ☐ Lijn 1
- ☐ Lijn 2
- ☐ Lijn 3
- ☐ Lijn 4
- ☐ Lijn 5




▲ **afbeelding 3**

**5** Met een positieve lens kun je een voorwerp afbeelden op een scherm.
Geef van elke bewering aan of deze waar is of onwaar.
Vergeleken met het voorwerp staat het beeld altijd op zijn kop.
*waar* / *onwaar*
Vergeleken met het voorwerp is het beeld altijd verkleind.
*waar* / *onwaar*

 Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

**Praktijk**

# Vloeistoflenzen

Je ooglens kan heel snel van dichtbij tot oneindig ver scherpstellen. Lenzen die een vaste vorm hebben, kunnen dit niet: het licht dat op een brillenglas valt, moet op een heel bepaalde manier breken om ervoor te zorgen dat een brildrager scherp kan zien. Ook een astronoom kent de beperkingen van de lenzen in zijn telescoop. Door turbulentie hoog in de lucht kunnen mooie ronde sterren dansend en spikkelig worden weergegeven. Deze problemen zijn te voorkomen door gebruik van een vloeistoflens die van vorm kan veranderen.



## Een waterdruppel als lens

Een vloeistofdruppel, bijvoorbeeld een waterdruppel, kan een heel eenvoudige lens zijn. Leg je een waterdruppel op een glazen plaatje, dan zal de druppel zijn ronde vorm behouden. Water heeft een andere brekingsindex dan lucht en glas, waardoor er breking optreedt. Als je het glazen plaatje op een bladzijde van een boek legt, zal de waterdruppel de letters en cijfers vergroten (figuur 1). De waterdruppel is dan een loep die de letters vergroot. De vergroting is het grootst als de druppel het kleinst is.

## De eerste watermicroscoop

Het gebruik van een waterdruppel als optisch hulpmiddel is niet nieuw. Aan het einde van de zeventiende eeuw ontwierp de Engelse wetenschapper Stephen Gray (1666–1736) als eerste een microscoop die niet gebruikmaakte van een glazen lens, maar van een waterdruppel. In deze

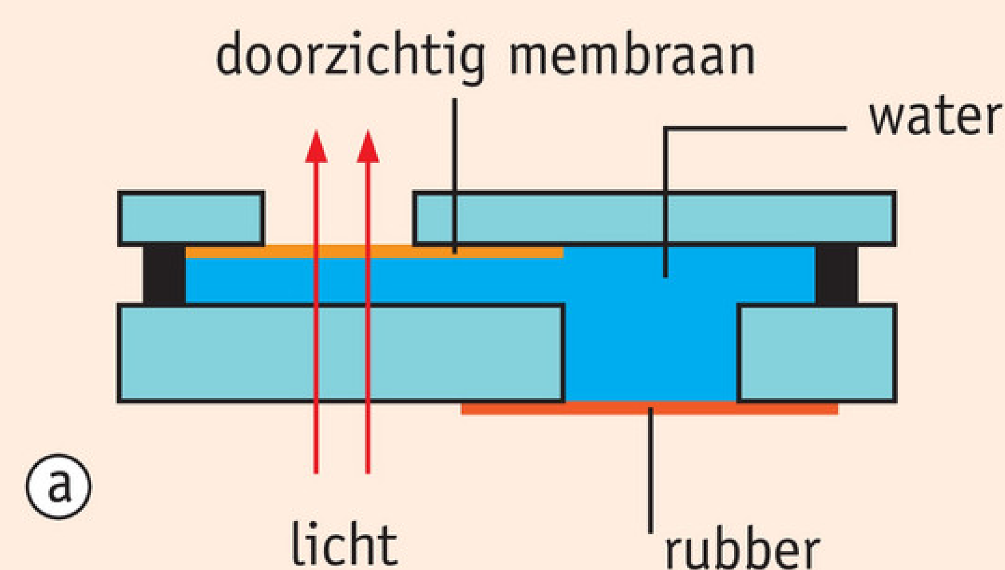
▶ **figuur 1** Een waterdruppel vergroot de letters.

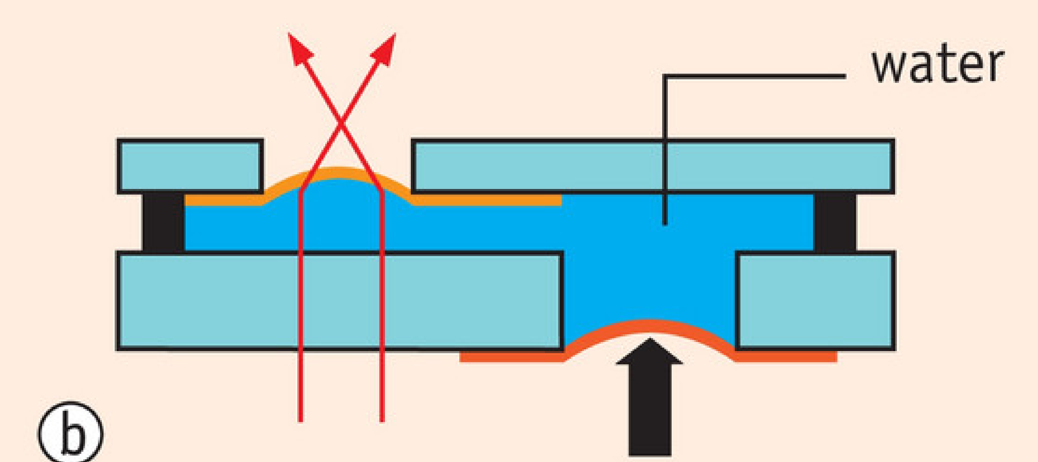
wa'terdier *o* (-en) dier dat in het water leeft.
wa'terdrager *m* (-s) die water aandraagt.
wa'terdruppel *m* (-druppels).
wa'teremmer *m* (-emmers).
wa'teren (waterde, h. gewaterd) 1 water geven, met water besproeien; 2 urine lozen; 3 golvingen, vlammen aanbrengen op (*zijde*): vgl. gewaterd.
wa'ter-en-vuur'baas *m* (-bazen) waterstoker, houder van een wa'ter-en-vuur'nering *v* (-en).
wa'terfilter *m* en *o* (-s) toestel tot zuivering van drinkwater.

De afgelopen jaren hebben wetenschappers veel onderzoek gedaan naar optisch inzoomen bij digitale camera's.



▲ **figuur 2** de eerste watermicroscoop




▶ **figuur 3** de werking van een vloeistoflens

watermicroscoop kon hij de bolvorm van de waterdruppel veranderen door aan een schroef te draaien (figuur 2). Hiermee kon hij het beeld van kleine voorwerpen scherpstellen en ze vergroot bekijken.

## Scherpe beelden

Een foto is met een mobiele telefoon snel gemaakt. En staat een voorwerp ver af, dan kun je inzoomen. Maar doordat de meeste camera's van mobiele telefoons maar één kleine lens hebben die op een vaste afstand van de ccd staat, is optisch inzoomen niet mogelijk. Een ccd is een lichtgevoelige chip. Bij optisch inzoomen bij bijvoorbeeld een spiegelreflexcamera bewegen verschillende lensdelen, zoals de lens of de ccd, ten opzichte van elkaar. Doordat deze bewegende onderdelen bij een mobiele telefoon klein en breekbaar zijn, is de kans op beschadigingen groot. Daarom vindt het inzoomen hier meestal digitaal plaats. Het nadeel is dat de pixels van het vergrote beeld groter zijn waardoor het beeld minder scherp is. De afgelopen jaren hebben wetenschappers veel onderzoek gedaan naar optisch inzoomen bij digitale camera's. De oplossing hebben ze niet gezocht in de bewegende onderdelen, maar in het materiaal van de lens. De glazen of kunststoflens is vervangen door een vloeistoflens, waarvan de sterkte gemakkelijk kan worden veranderd.

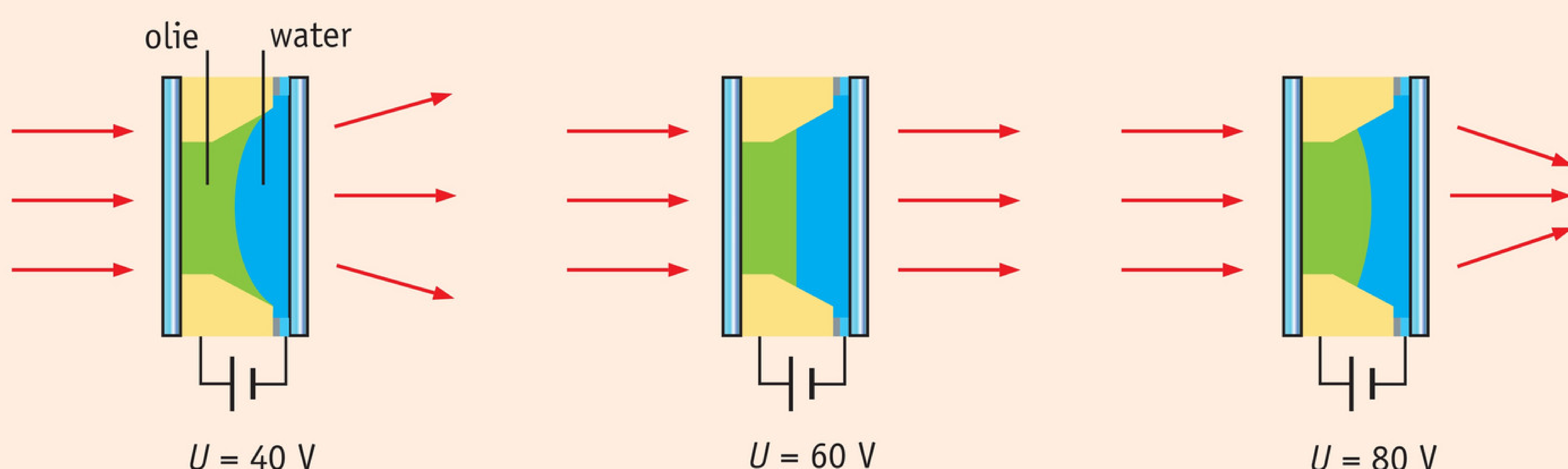
## De vloeistoflens

Het principe van de vloeistoflens is eenvoudig. Stephen Gray liet driehonderd jaar geleden al zien dat de bolling en dus de brandpuntsafstand van een vloeistofdruppel kan worden veranderd door erop te drukken. Figuur 3 toont hoe dit eeuwenoude principe tegenwoordig heel eenvoudig

kan worden toegepast. In dit geval is de vloeistof water. De bolling van het wateroppervlak hangt af van hoe hard er op het water wordt gedrukt. Hoe harder er wordt gedrukt, hoe boller de waterlens wordt en dus hoe kleiner de brandpuntsafstand is.

Er bestaan ook vloeistoflenzen waarvan de bolling met elektrische spanning wordt geregeld (figuur 4). Zo'n vloeistoflens bestaat uit een kokertje met daarin water en olie. Deze vloeistoffen mengen niet met elkaar en hebben elk een andere brekingsindex.

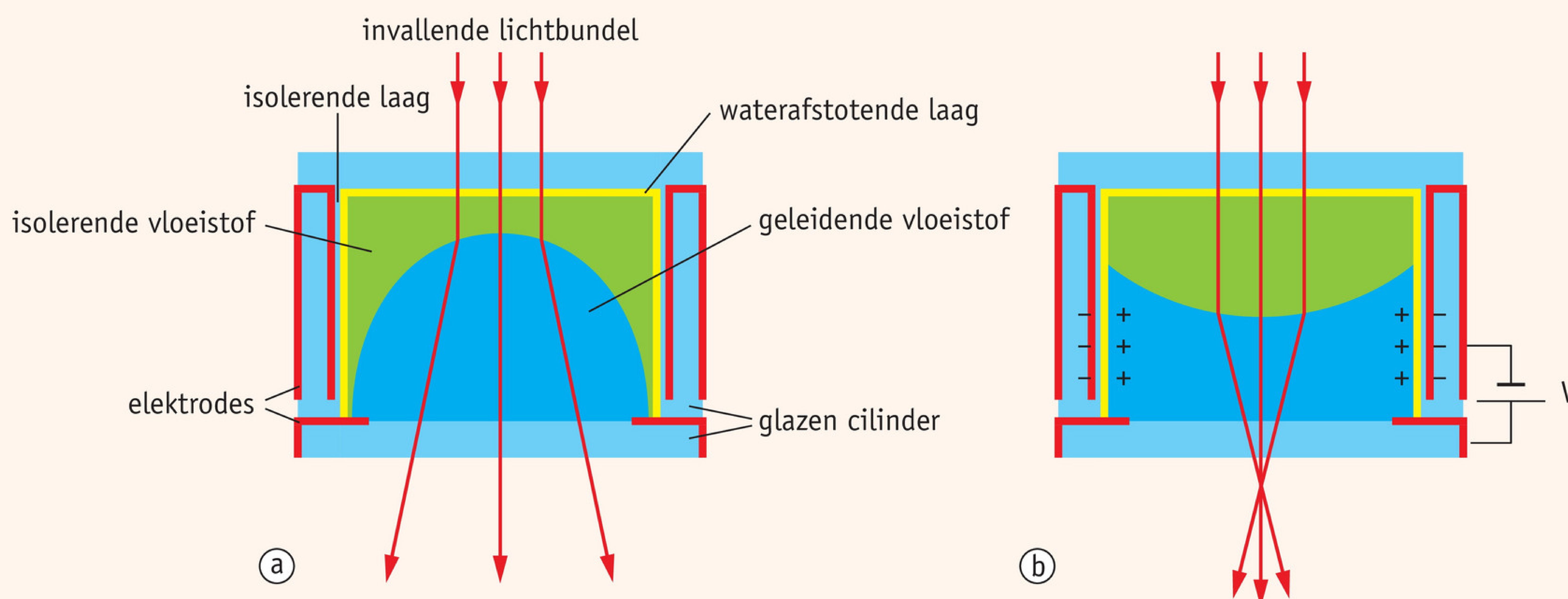
Als er over twee contactpunten een spanning wordt gezet, verandert de vorm van de watermeniscus (het wateroppervlak). Bij een heel bolle watermeniscus breekt het licht meer bij de grenslaag tussen water en olie dan bij een minder bolle lens. De




◀ **figuur 4** een vloeistoflens bij verschillende spanningen

## Variabele vloeistoflens

De vloeistoflens is opgebouwd uit twee verschillende, niet mengbare, vloeistoffen. De ene vloeistof is elektrisch geleidend (bijvoorbeeld gezouten water), de andere isolerend (bijvoorbeeld olie). De vloeistoffen zijn opgesloten in een cilindrische behuizing. De binnenwand van de cilinder is van een geleidende laag voorzien die zelf weer bedekt is met een isolerende laag en daarbovenop ten slotte een waterafstotende laag. Een van de afdekplaatjes van de cilinder is ook bedekt met deze waterafstotende laag, terwijl het andere gedeeltelijk is bedekt met een geleidende laag die geïsoleerd is van de geleidende laag op de cilinder. Als een potentiaalverschil wordt aangebracht over de twee geleidende lagen (elektrodes), bouwt zich een lading op in de geleidende vloeistof, aan de binnenzijde van de cilinder: de oppervlaktelading.
*bron: Fotonica Magazine*




▲ **figuur 5** een variabele vloeistoflens

brandpuntsafstand van de vloeistoflens is dan klein. Ideaal als je een foto wilt maken van een voorwerp dat dichtbij staat.
Dit soort vloeistoflenzen kan heel snel van vorm veranderen. In nog geen 10 ms kan de brandpuntsafstand veranderen van 5 cm tot oneindig.
Daarnaast is de lens duurzaam. Met gemak kan de brandpuntsafstand meer dan een miljoen keer worden gewijzigd zonder dat de lens stukgaat. De vloeistoflens lijkt dus veel op een lens van het menselijk oog.

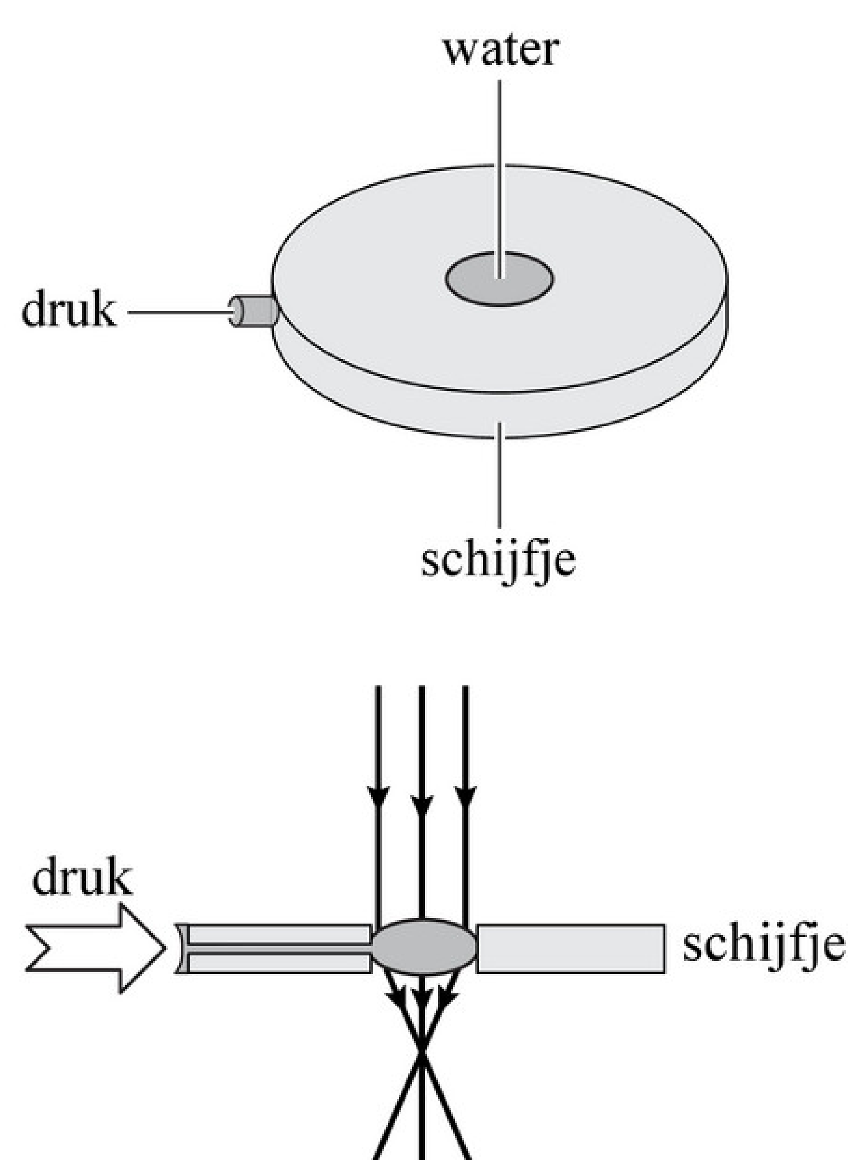
## Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

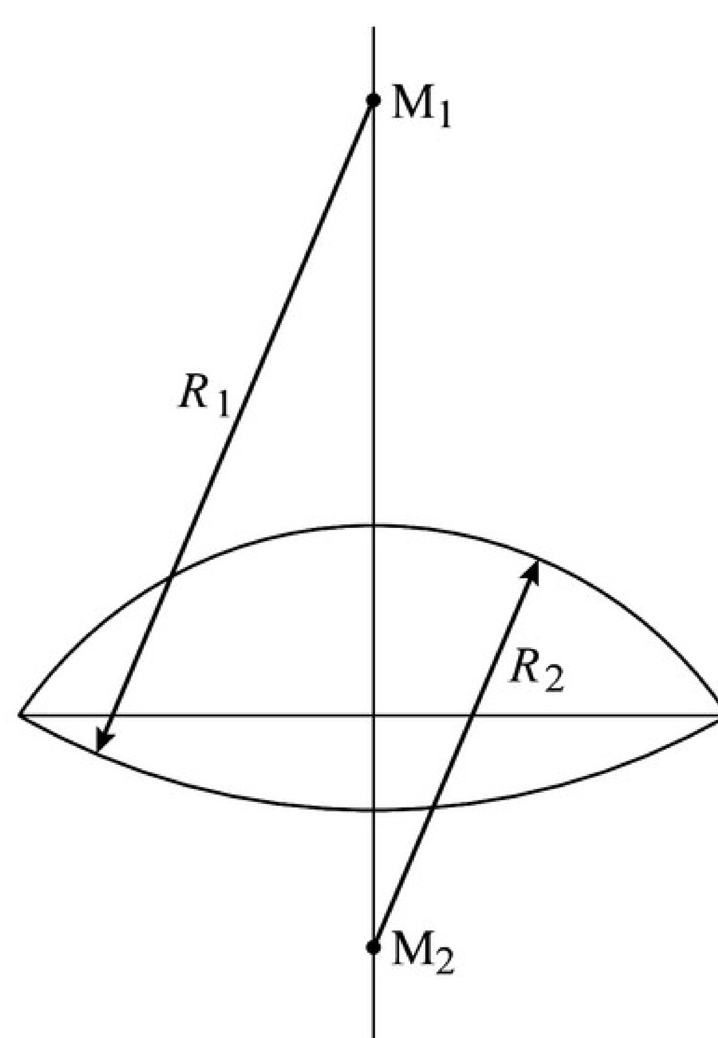
**1** Brandpuntsafstand
De brandpuntsafstand van een vloeistoflens ligt tussen de 5 cm en oneindig.
- **a** Teken de vorm van een lens met een oneindig grote brandpuntsafstand.
- **b** Het water in de getekende lens van figuur 3 wordt vervangen door een vloeistof met een grotere brekingsindex.
  Leg uit of de minimale brandpuntsafstand van de lens hierdoor groter of kleiner wordt.

**2** Waterdruppel
In figuur 6 zie je een eenvoudige uitvoering van een waterlens. Door via een dun kanaaltje in het schijfje meer druk op het water te zetten, wordt de lens boller.
Voor de brandpuntsafstand van een bolle lens geldt de lenzenmakersformule. $M_1$ en $M_2$ in figuur 7 zijn de middelpunten van de boloppervlakken. Voor een bepaalde waterlens zijn de beide stralen even groot. Die lens heeft voor rood licht een brandpuntsafstand van 25 mm.
- **a** Bereken de straal van de boloppervlakken van die waterlens.
- **b** Onder invloed van de zwaartekracht kan de waterlens een beetje uitzakken. Hierdoor zijn de stralen $R_1$ en $R_2$ niet meer gelijk.
  Stel dat $R_1$ een factor 2 kleiner wordt en $R_2$ tegelijkertijd een factor 2 groter.
  Beredeneer aan de hand van de lenzenmakersformule of hierdoor de brandpuntsafstand van de lens groter wordt, kleiner wordt of gelijk blijft.
- **c** Figuur 8 is een vergrote tekening van een bolle waterlens. Een rode lichtstraal valt evenwijdig aan de hoofdas in.
  Neem figuur 8 over en construeer het vervolg van deze lichtstraal door de lens totdat hij de hoofdas snijdt. Noteer de grootte van de brekingshoeken.

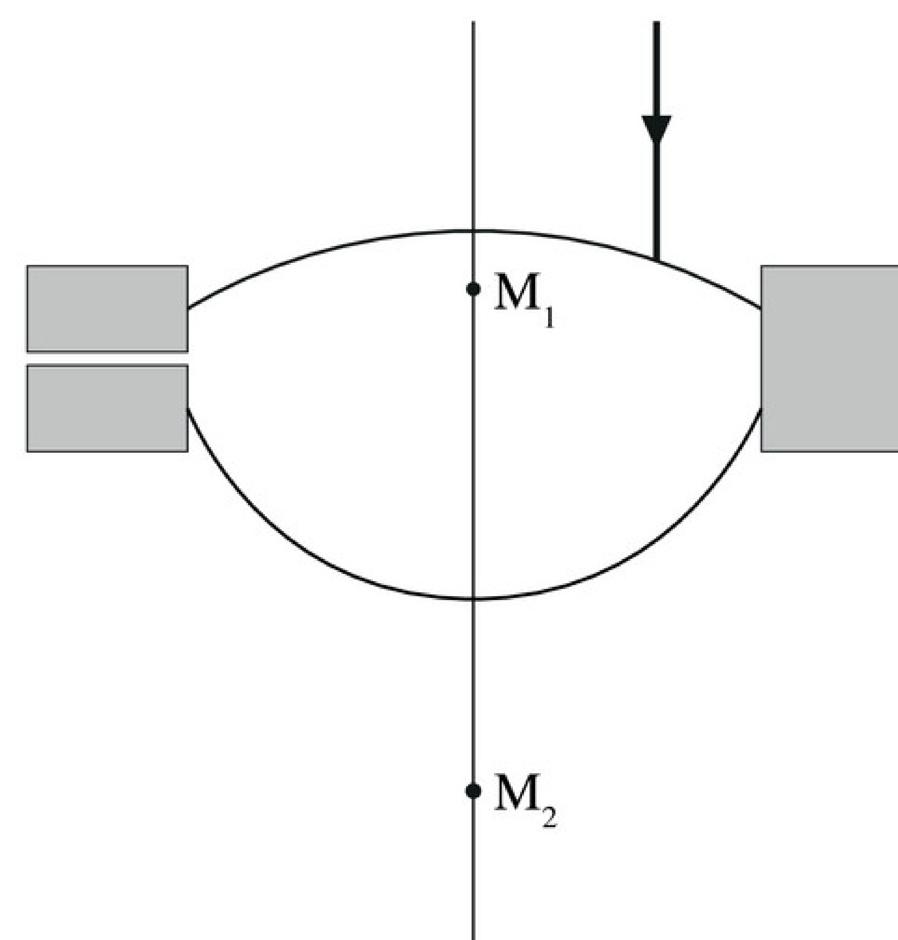
*naar: examen vwo 2010-II*




▲ **figuur 6** de waterlens




▲ **figuur 7** de waterlens schematisch




▲ **figuur 8** een vergrote tekening van een bolle waterlens

# 1 Spiegelbeeld

In deze paragraaf leer je:
- de spiegelwet toepassen;
- beeldconstructies bij een vlakke spiegel maken.

Als je in een spiegel kijkt, zie je een beeld van de voorwerpen en de omgeving om je heen. Licht afkomstig van deze voorwerpen valt op de spiegel en wordt volgens de spiegelwet weerkaatst.

## Lichtbronnen

Je kunt voorwerpen zien in de volgende situaties:
- Het voorwerp zendt zelf licht uit, zoals een ledlamp, een ster of een vlam. Zo'n voorwerp noem je een **directe lichtbron**.
- Het voorwerp zendt zelf geen licht uit, maar weerkaatst het licht dat erop valt. Deze **indirecte lichtbron** weerkaatst dan licht van de zon, een lamp of een andere directe lichtbron.

## Terugkaatsing

Het is gevaarlijk om met het blote oog in een laserstraal te kijken. Het licht van de laser is zo fel dat je er blind door kunt worden. Laserlicht kun je niet zien, tenzij het licht op een voorwerp valt. Het voorwerp weerkaatst een deel van dit licht dan in de richting van je oog, waardoor je het ziet.
Om een laserbundel zichtbaar te maken, moet het laserlicht tegen deeltjes botsen. Dit kan bijvoorbeeld door een laser op een rook- of stofwolk te schijnen. Je ziet dan de hele bundel (figuur 1).



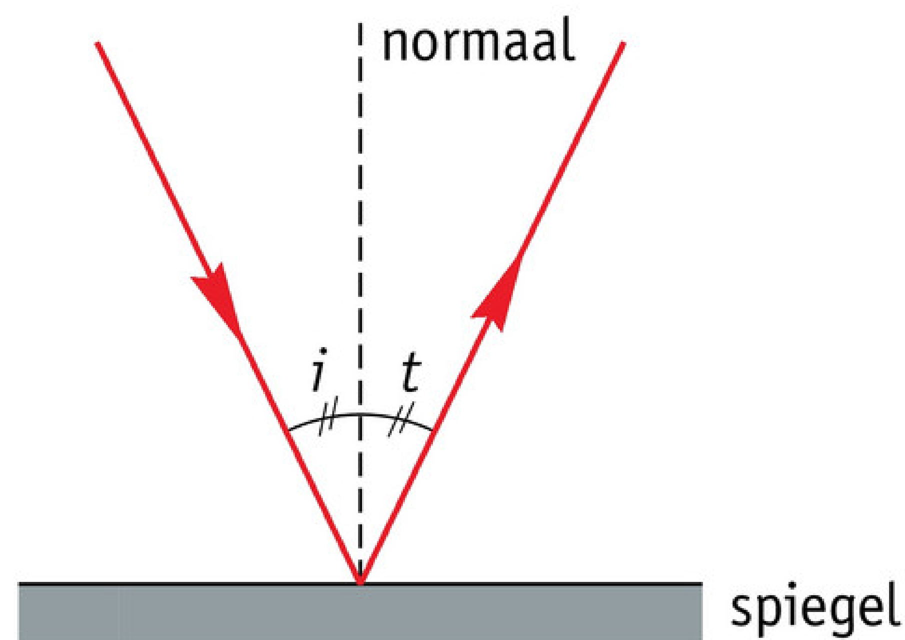
▲ **figuur 1** een zichtbare laserstraal dankzij een rookwolk

Glas en water zijn doorzichtige stoffen. Deze stoffen laten het licht goed door, maar toch zal een klein deel van het oorspronkelijke licht worden geabsorbeerd. Dit licht wordt dan omgezet in warmte.
Glanzende stoffen absorberen veel minder licht. Deze stoffen weerkaatsen vrijwel al het licht. Als een smalle lichtbundel op een glanzend plat oppervlak valt, geldt de spiegelwet. De spiegelwet luidt:

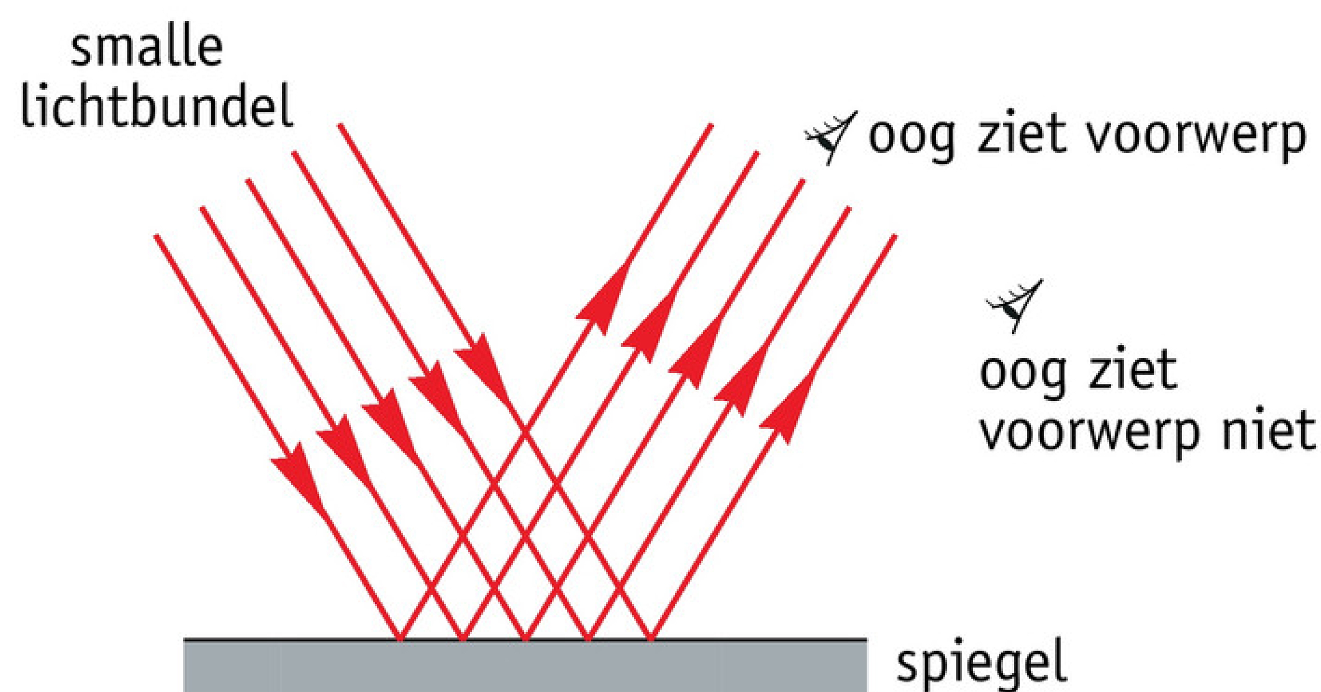
$$\angle i = \angle t$$

Hierin is:
- $i$ de hoek van inval in graden (°);
- $t$ de hoek van terugkaatsing in graden (°).

De invalshoek wordt altijd gemeten ten opzichte van de **normaal**. De normaal is een denkbeeldige lijn loodrecht op het spiegelend oppervlak. Dus de invalshoek is de hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal. De hoek van terugkaatsing is de hoek tussen de teruggekaatste lichtstraal en de normaal (figuur 2).
Als een evenwijdige bundel licht schuin op een glanzend glad voorwerp valt, zoals een spiegel of een gepolijst stukje metaal, wordt deze volgens de spiegelwet *in één richting* weerkaatst (figuur 3). Dit heet **spiegelende terugkaatsing**. De teruggekaatste lichtbundel kun je alleen zien als deze je oog treft. Je kunt dit zelf proberen door met een zaklamp op een spiegel te schijnen.

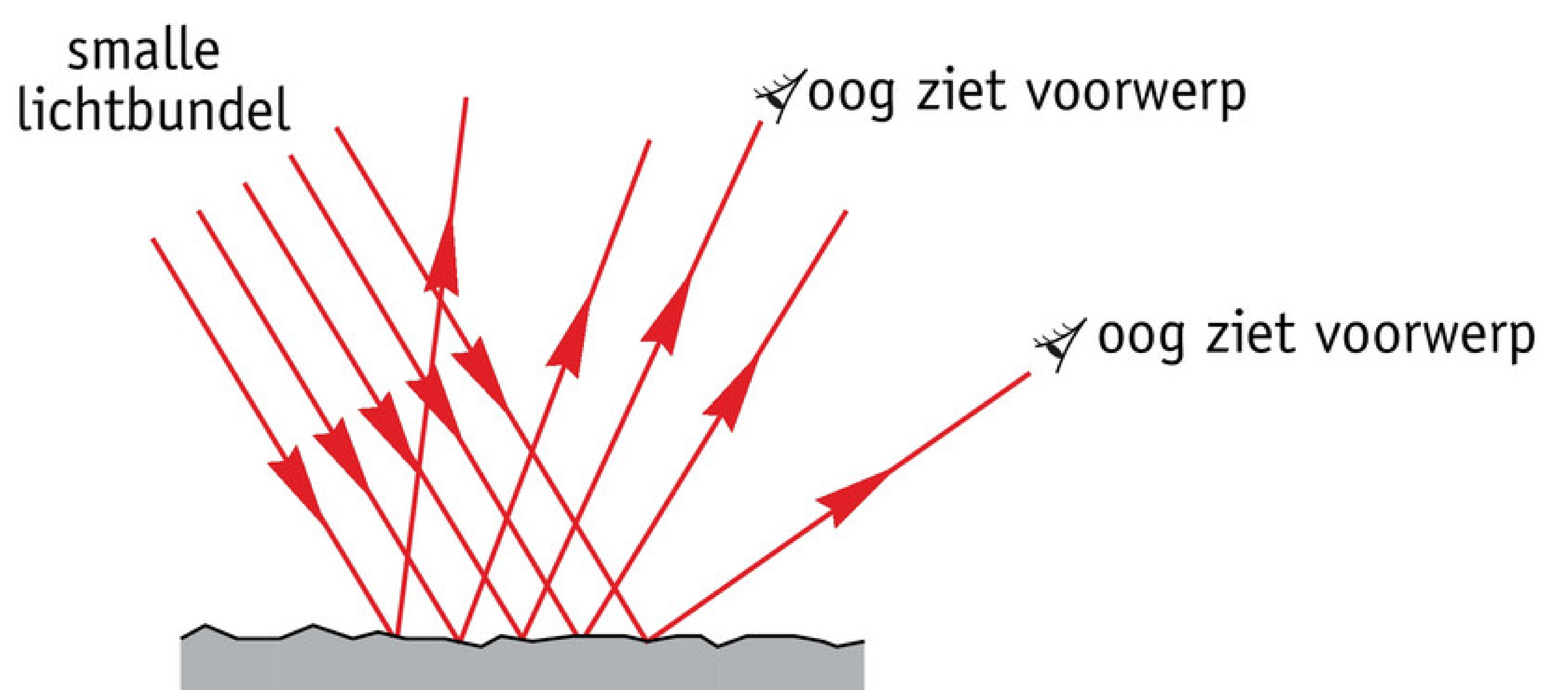



▲ **figuur 2** de spiegelwet toegepast bij een spiegel




▲ **figuur 3** evenwijdige terugkaatsing

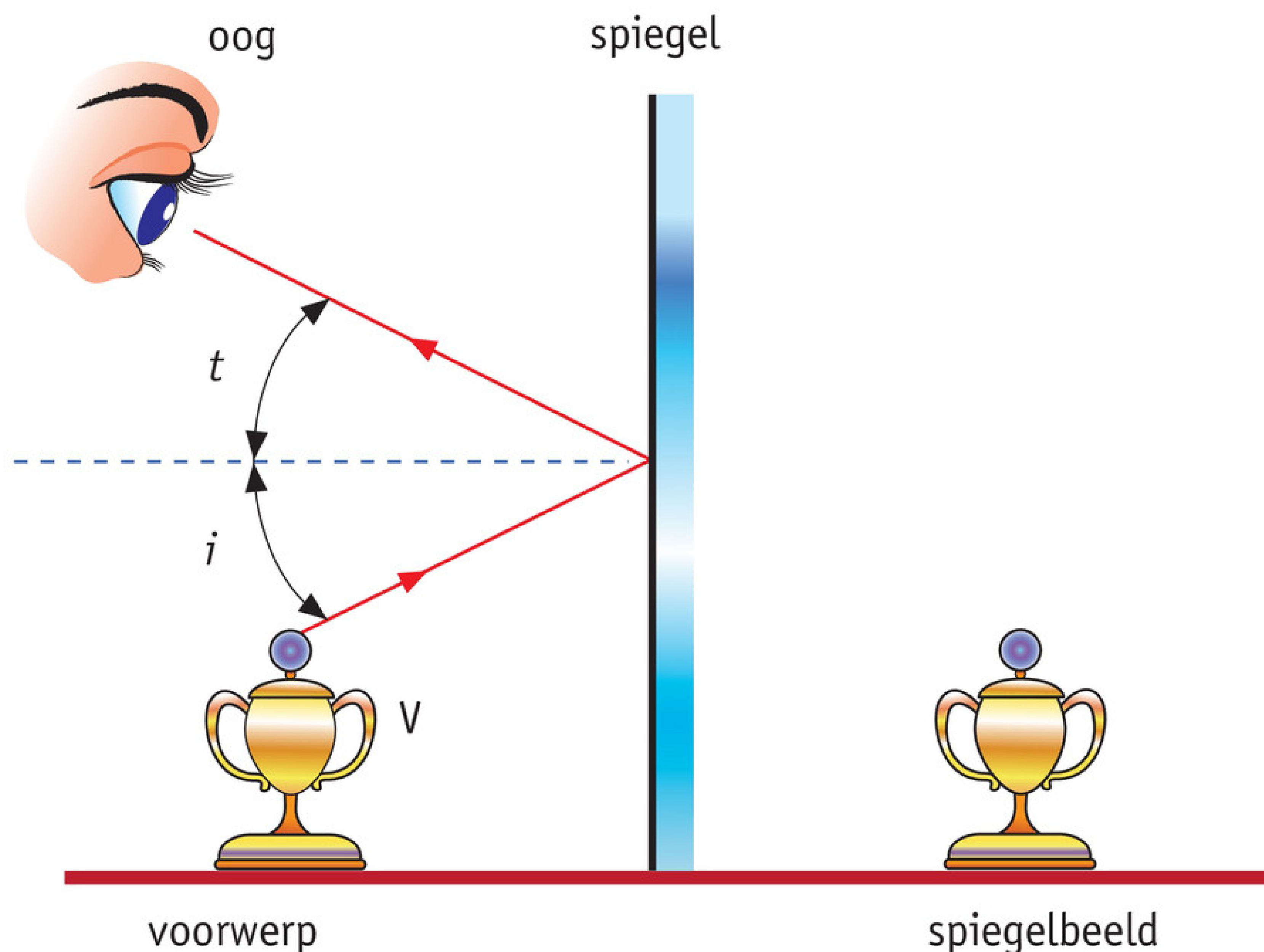
De meeste voorwerpen om ons heen zijn niet glad maar een beetje ruw. Als een evenwijdige bundel licht schuin op deze voorwerpen valt, wordt het licht door al die verschillend gerichte oppervlakjes, volgens de spiegelwet, in allerlei richtingen weerkaatst (figuur 4). Dit heet **diffuse terugkaatsing**. Je kunt het voorwerp vanuit vele richtingen zien.




▲ **figuur 4** terugkaatsing in vele richtingen

## Beeldconstructie

Kijk je via een spiegel naar een voorwerp, dan zie je een beeld van het voorwerp. Vanuit elk punt van dit voorwerp vertrekken in vele richtingen lichtstralen. In figuur 5 zie je één lichtstraal getekend.



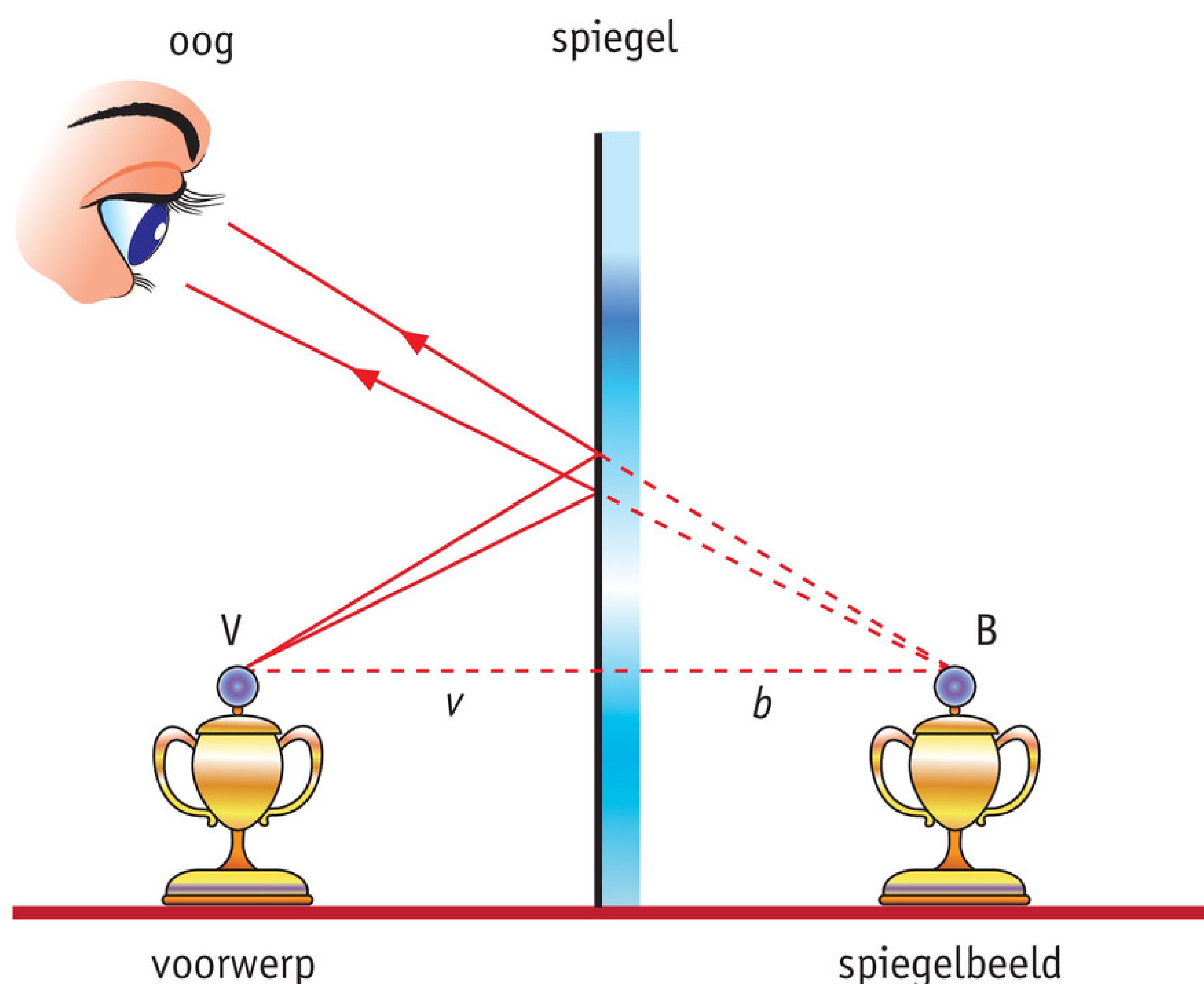

▲ **figuur 5** terugkaatsing volgens de spiegelwet

***Beeldconstructie met behulp van de spiegelwet***

Een lichtstraal afkomstig uit een voorwerpspunt V treft de spiegel en wordt volgens de spiegelwet weerkaatst richting het oog (figuur 5). Dit kun je tekenen. Op de plek waar de lichtstraal de spiegel raakt, teken je eerst de normaal waarna je invalshoek *i* meet. Vervolgens zet je terugkaatsingshoek *t* uit die even groot is als de invalshoek. Ten slotte teken je de teruggekaatste lichtstraal.
Er is nog een andere manier om de teruggekaatste lichtstraal te construeren. Hierbij maak je gebruik van het gegeven dat het spiegelbeeld van een voorwerp (bij een vlakke spiegel) altijd even ver achter de spiegel staat als het voorwerp ervoor.

***Beeldconstructie met behulp van het spiegelbeeld***

Teken eerst (spiegel)beeldpunt B van voorwerpspunt V. Dit doe je door een lijn vanuit het voorwerp loodrecht op de spiegel te tekenen en deze lijn aan de andere kant van de spiegel door te trekken; het beeldpunt moet even ver van de spiegel staan als het voorwerpspunt. In figuur 6 geldt dus: $b = v$.
Alle lichtstralen die vanuit voorwerpspunt V op de spiegel vallen, lijken van beeldpunt B te komen, dus ook de lichtstralen die van V naar het oog gaan. De lichtstralen achter de spiegel zijn slechts hulplijnen en moeten daarom worden gestippeld (figuur 6).

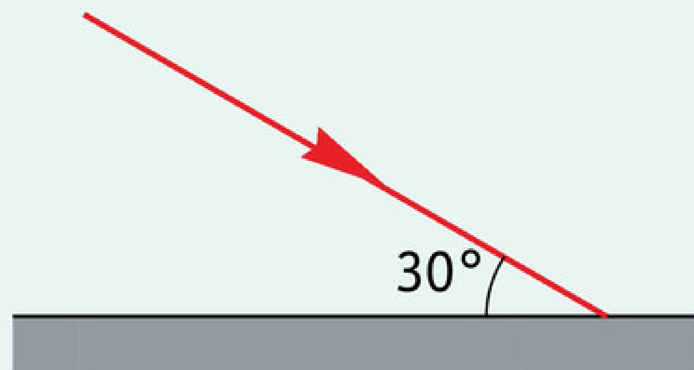



▲ **figuur 6** beeldconstructie met behulp van spiegelbeeld B

Het lijkt alsof lichtstralen naar het beeld gaan of uit het beeld komen. De hersenen veronderstellen namelijk dat licht dat onze ogen treft, altijd rechtdoor gaat. In werkelijkheid gaan er geen lichtstralen door beeld B. Als je achter de spiegel een scherm of vel papier houdt, dan zijn daar immers ook geen lichtstralen en is er ook geen beeld. Je ziet het beeld wel, maar je kunt het niet projecteren. Dit noem je een **virtueel beeld**. Een **reëel beeld** ontstaat als er wel lichtstralen door het beeld gaan. Je ziet het beeld en je kunt het projecteren. Later in dit hoofdstuk leer je dat lenzen reële beelden kunnen vormen, zoals op het projectiescherm van een beamer of op het ccd-schermpje van een digitale fotocamera.

**Voorbeeldopgave 1**

Een laserstraal treft een vlakke spiegel onder een hoek van 30° (figuur 7).

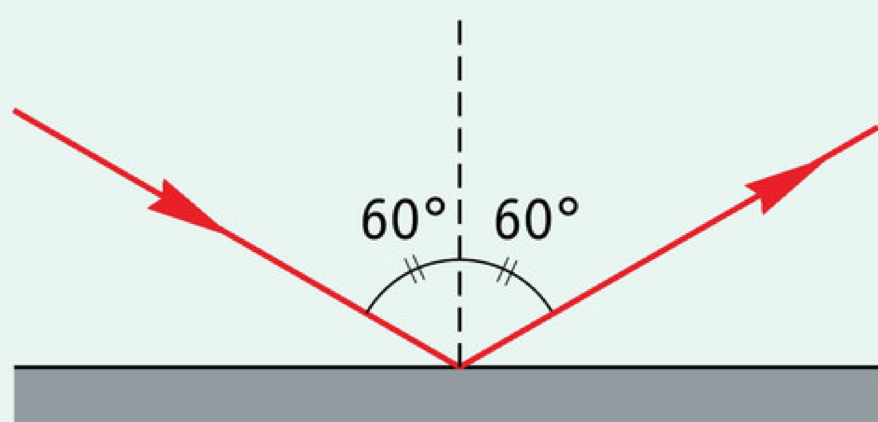



▲ **figuur 7** Een laserstraal treft een vlakke spiegel onder een hoek van 30°.

Construeer de teruggekaatste laserstraal.

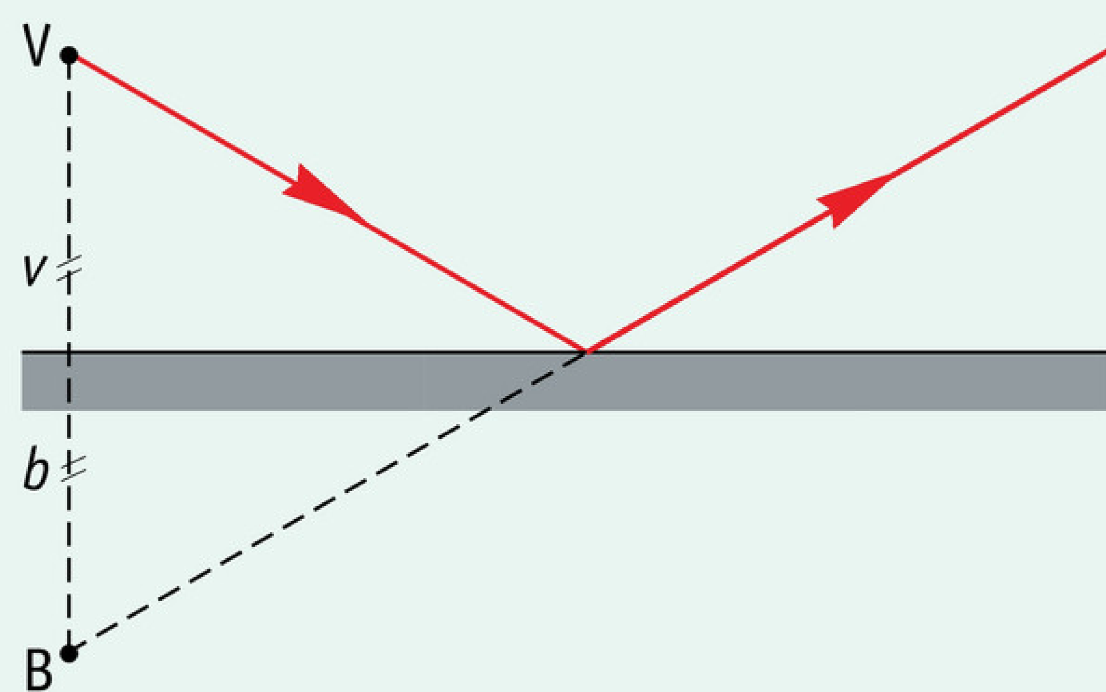
*Uitwerking*

1 *Met behulp van de spiegelwet*
Teken eerst de normaal loodrecht op de spiegel daar waar de laserstraal de spiegel treft (figuur 8).
Invalshoek $i$ is 90° – 30° = 60°.
Uit $\angle i = \angle t$ geldt dat de terugkaatsingshoek ook 60° is.




▲ **figuur 8** Teken de hoek van terugkaatsing volgens de wet van terugkaatsing.

2 *Met behulp van (spiegel)beeldpunt B*
Teken voorwerpspunt V waarvan de lichtstraal vertrekt en meet loodrecht op de spiegel voorwerpsafstand $v$. Teken op dezelfde afstand (beeldafstand $b$) achter de spiegel beeldpunt B (figuur 9). Stippel de lijn tussen voorwerpspunt V en beeldpunt B. Teken vanaf beeldpunt B een lijn door het punt waarop de invallende laserstraal de spiegel treft. Achter de spiegel is deze lijn een hulplijn, dus gestippeld. Voor de spiegel is dit de teruggekaatste lichtstraal.




◀ **figuur 9** beeldconstructie met behulp van voorwerpsafstand en beeldafstand

Soms moet je bij de constructie met behulp van het spiegel*beeld* de spiegel in gedachten verlengen (verder stippelen) om het beeldpunt te kunnen construeren. Verder kun je deze manier van beeldconstructie niet gebruiken bij een bolle of holle spiegel. De constructie met behulp van de spiegel*wet* mag je wel altijd gebruiken.

## Onthoud!

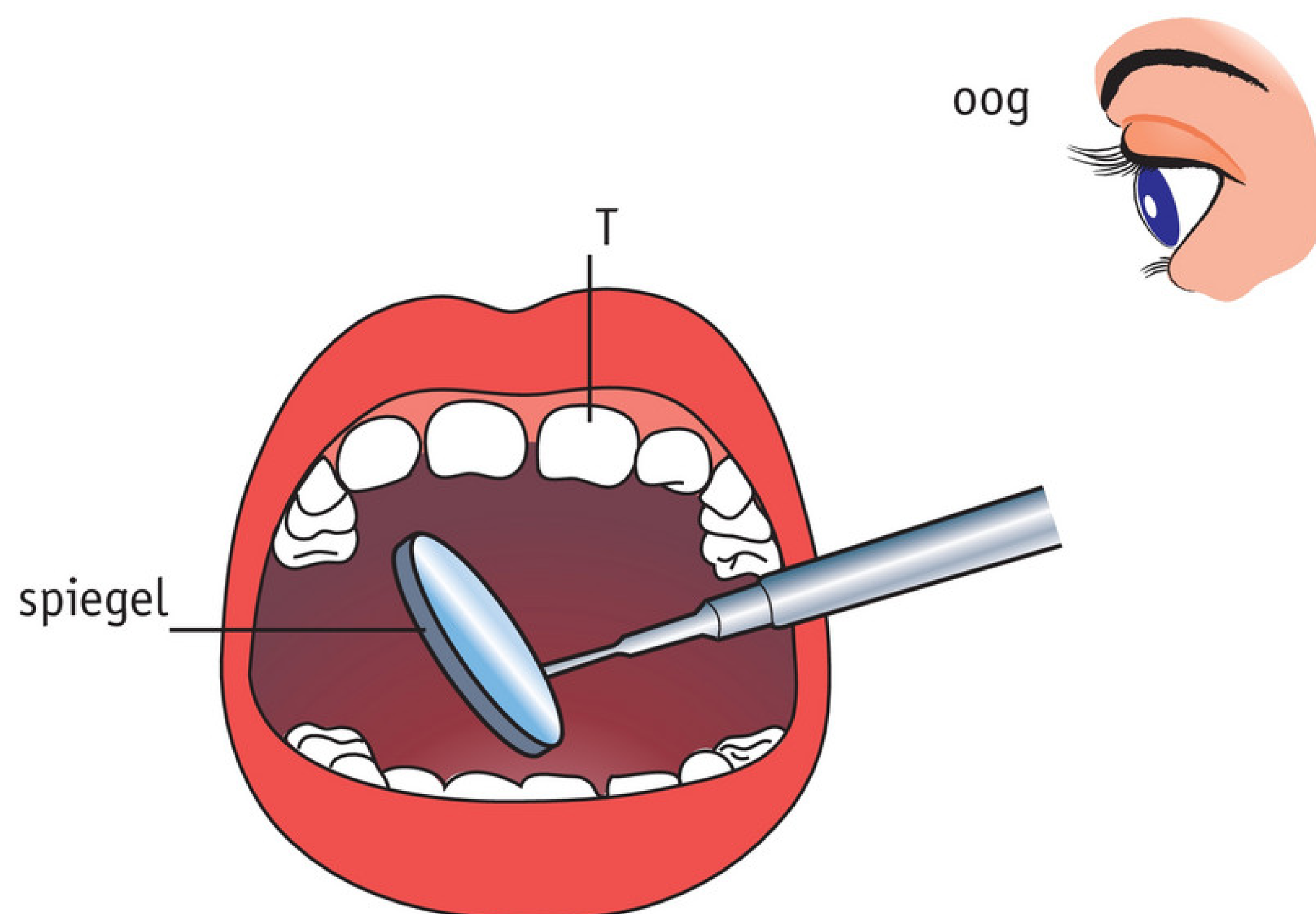
- Bij diffuse terugkaatsing wordt een evenwijdige lichtbundel in vele richtingen weerkaatst; bij spiegelende terugkaatsing wordt deze in één richting weerkaatst.
- Bij terugkaatsing van lichtstralen geldt de spiegelwet: $\angle i = \angle t$
- De hoek van inval $i$ is de hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal; de hoek van terugkaatsing $t$ is de hoek tussen de teruggekaatste lichtstraal en de normaal.
- Het (spiegel)beeldpunt B staat even ver van de spiegel als het voorwerpspunt V. De lijn tussen B en V staat loodrecht op de spiegel.
- Beelden die je kunt projecteren, zijn reële beelden; beelden die je wel ziet maar niet kunt projecteren, zijn virtuele beelden.

## Opdrachten

**1** Spiegelwet
Met behulp van de spiegelwet kun je voorspellingen doen over de teruggekaatste lichtstraal.
**a** Leg het verschil uit tussen spiegelende en diffuse terugkaatsing.
**b** Leg uit wat wordt bedoeld met het begrip ‘normaal’.
**c** Leg de spiegelwet uit.

**2** Lichtstraal
Een lichtstraal valt op een vlakke spiegel in onder een hoek van 40°.
Teken de situatie en construeer de teruggekaatste lichtstraal.

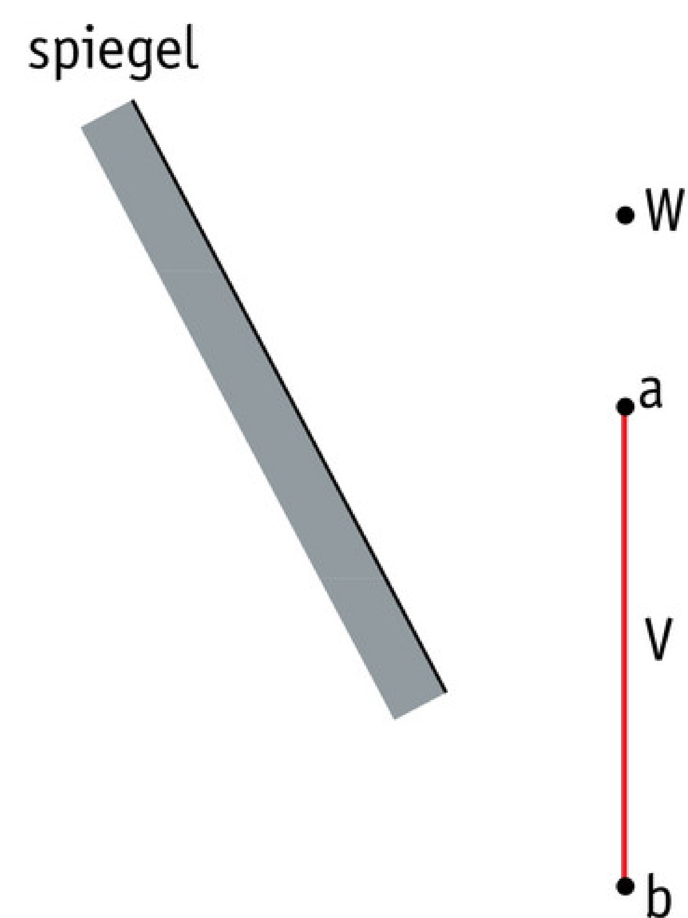
**3** Bij de tandarts
Een tandarts bekijkt via een spiegeltje de achterkant van een tand (figuur 10).




▲ **figuur 10** Een tandarts gebruikt een spiegeltje om de achterkant van je voortanden te bekijken.

Construeer in figuur 10 een lichtstraal die van tand T via de spiegel wordt weerkaatst richting het oog.

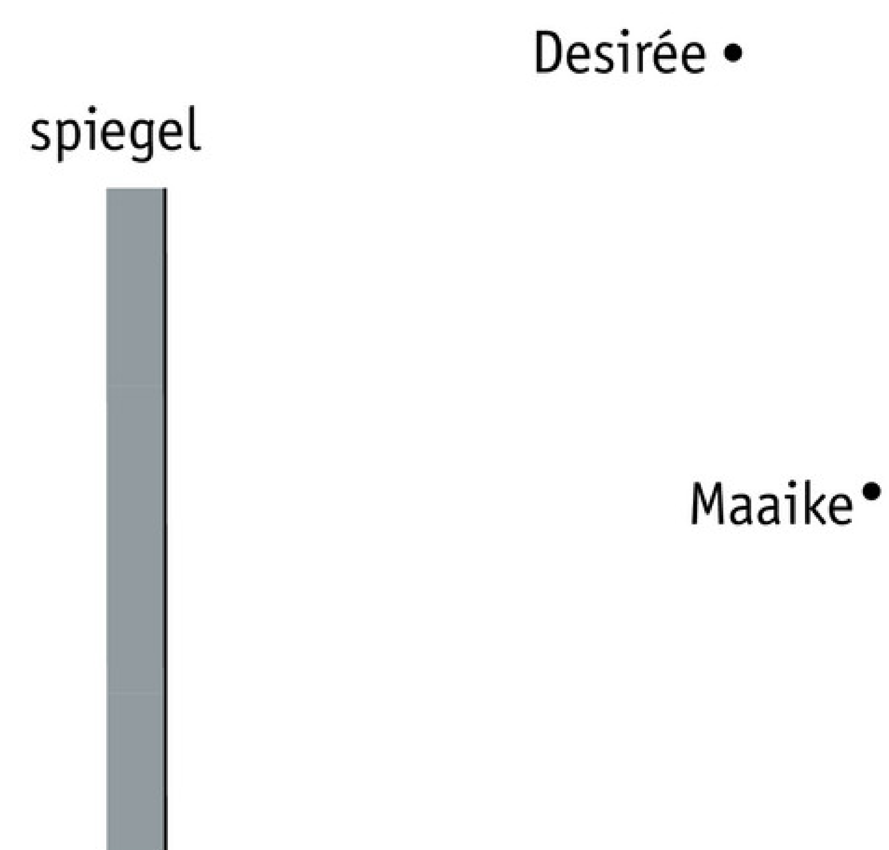
**4** Vlakke spiegel [1]
Een voorwerp V (met uiteinden a en b) staat voor een vlakke spiegel. Waarnemer W kijkt via de spiegel naar V (figuur 11).




◀ **figuur 11** een voorwerp voor een vlakke spiegel

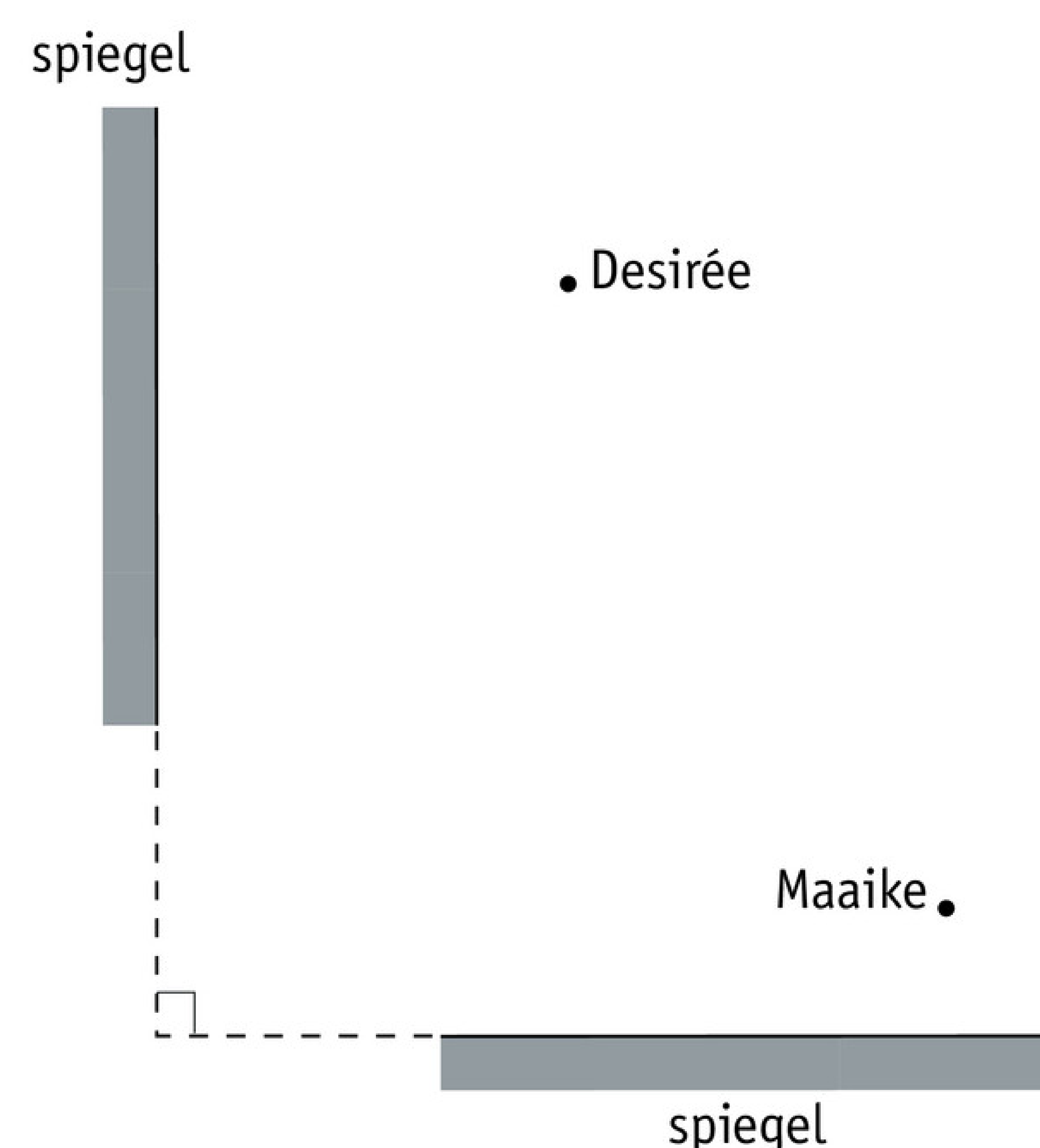
Bepaal door middel van een constructie welk deel van het voorwerp de waarnemer ziet.

**5** Vlakke spiegel [2]
Desirée en Maaike staan voor een vlakke spiegel (figuur 12).




◀ **figuur 12** Desirée en Maaike voor een vlakke spiegel

**a** Construeer in figuur 12 de plaats van de beeldpunten van Desirée en Maaike.
**b** Leg met behulp van een constructie uit of Desirée en Maaike elkaar kunnen zien in de spiegel.
**c** Desirée en Maaike staan nu voor twee vlakke spiegels die loodrecht op elkaar staan (figuur 13).




◀ **figuur 13** Desirée en Maaike

Construeer in figuur 13 de lichtstraal van Desirée naar Maaike die wordt weerkaatst door beide spiegels.

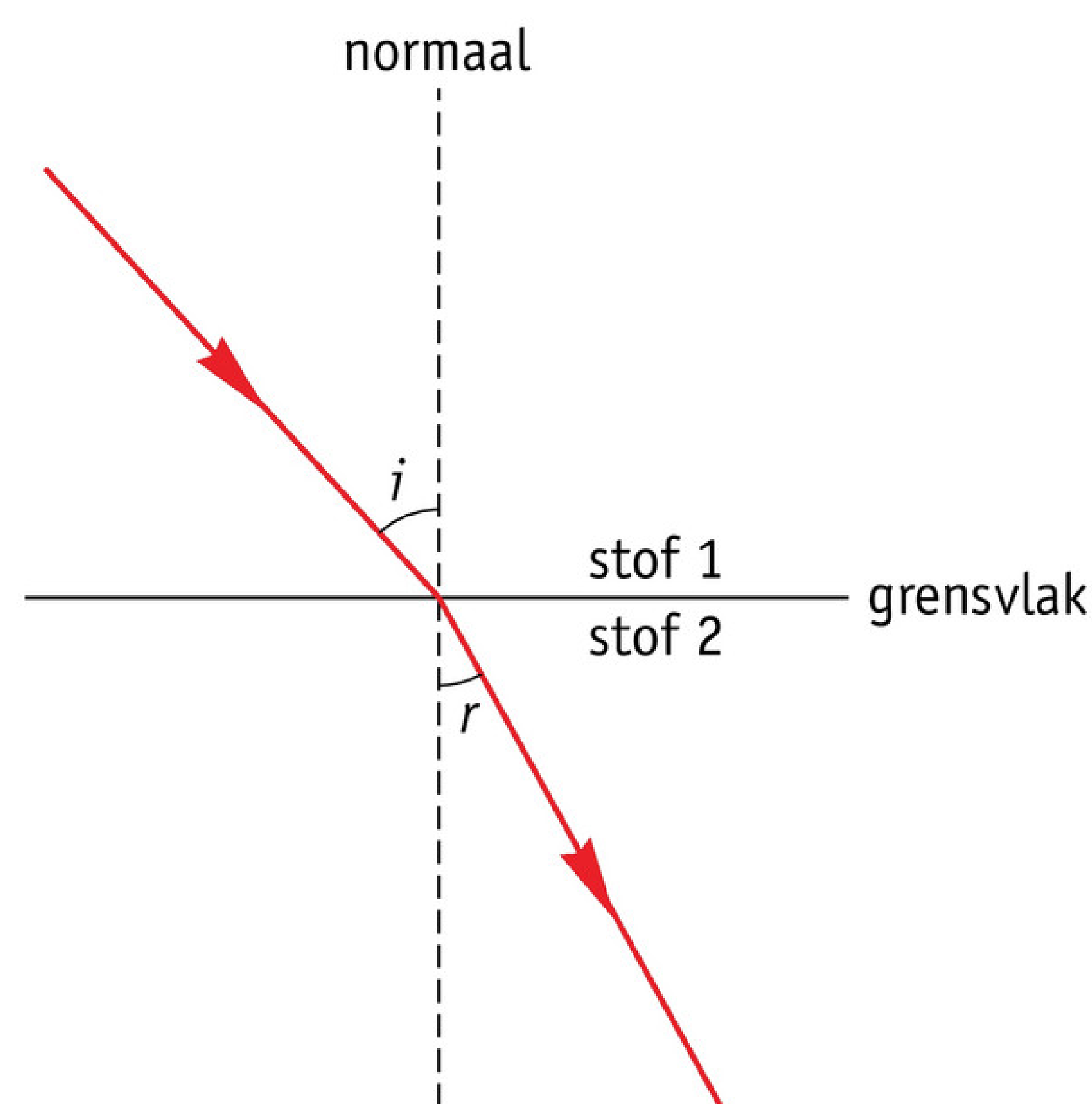
# 2 Breking bij lenzen

In deze paragraaf leer je:
- berekeningen maken met de wet van Snellius;
- enkele eigenschappen van lenzen kennen: brandpunt en sterkte;
- berekeningen maken met de lenzenmakersformule.

Lenzen worden gebruikt om voorwerpen af te beelden. Vaak is zo'n beeld groter of kleiner dan het voorwerp zelf. De lens moet het licht afkomstig van het voorwerp dan wel eerst breken.

## Brekingswet

Als zonlicht op een glazen raam valt, zal een deel van het zonlicht op het grensvlak lucht–glas terugkaatsen. Bij deze weerkaatsing geldt de spiegelwet. Het grootste deel van het licht wordt doorgelaten. Als het zonlicht echter scheef op het grensvlak valt, zal het doorgelaten licht op het grensvlak breken (er komt een knik in).
In figuur 14 zie je een lichtstraal die breekt nadat deze op een grensvlak valt.




▲ **figuur 14** breking van een lichtstraal op een grensvlak

Net als bij de spiegelwet is de invalshoek *i* de hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal. De brekingshoek *r* is de hoek tussen de gebroken lichtstraal en de normaal.
Op basis van experimenten formuleerde de Leidse wetenschapper Willebrord Snellius (dit is zijn Latijnse naam, hij heette Willebrord Snel van Royen; 1580–1626) in 1621 een vergelijking die bekendstaat als de wet van Snellius. Deze luidt als volgt:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Hierin is:
- $i$ de invalshoek in graden (°);
- $r$ de brekingshoek in graden (°);
- $n_2$ de brekingsindex van de stof (stof 2) waar de lichtstraal *naartoe* gaat (geen eenheid);
- $n_1$ de brekingsindex van de stof (stof 1) *waarvandaan* de lichtstraal komt (geen eenheid).

De **brekingsindices** $n_1$ en $n_2$ zijn stofeigenschappen. Ook vacuüm heeft een brekingsindex: $n_{vacuüm}$ is per definitie exact gelijk aan 1. De brekingsindex van een stof kan experimenteel worden bepaald met de wet van Snellius door een lichtstraal vanuit vacuüm op de stof te laten invallen.

Als je de wet van Snellius dan toepast, krijg je immers: $\dfrac{\sin i}{\sin r} = \dfrac{n_{\text{stof}}}{n_{\text{vacuüm}}} = \dfrac{n_{\text{stof}}}{1} = n_{\text{stof}}$

Als je de hoek van inval en breking opmeet, kun je zo de brekingsindex van de stof uitrekenen. De brekingsindex van vacuüm en lucht zijn bijna gelijk ($n_{\text{lucht}}$ = 1,000 292). Als je de waarden in drie significante cijfers opschrijft, zijn ze exact gelijk: $n_{\text{vacuüm}} = n_{\text{lucht}}$ = 1,00. Daarom kun je een meting van de brekingsindex ook uitvoeren door de lichtstraal vanuit *lucht* op die stof te laten invallen. In Binas tabel 18 vind je van een aantal verschillende vaste stoffen en vloeistoffen de brekingsindex die op deze manier is bepaald.

**Voorbeeldopgave 2**

Een lichtstraal in lucht valt in op een blok ijs. De hoek van inval is 30°, de (gemeten) hoek van breking is 22°.
Bereken de brekingsindex van ijs.

*Uitwerking*
De lichtstraal gaat van lucht (stof 1) naar ijs (stof 2). Er geldt dus $n_1$ = 1,00 en $n_2$ is gevraagd.
Verder is $i$ = 30° en $r$ = 22°.
Invullen in de wet van Snellius geeft:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin 30°}{\sin 22°} = \frac{n_2}{1,00}\text{, dus } n_2 = 1,3$$

De brekingsindex van ijs is dus $n$ = 1,3.

Stoffen als glas en perspex worden vaak gebruikt in lenzen van bijvoorbeeld brillen. Voor opticiens is het belangrijk om te weten hoe een lichtstraal precies gebroken wordt. Als je de brekingsindex van een stof weet, kun je exact voorspellen hoe een lichtstraal wordt gebroken door die stof.

**Voorbeeldopgave 3**

Een blauwe lichtstraal in lucht valt onder een hoek van 40° met de normaal op een perspex plaat.
Bereken de brekingshoek.

*Uitwerking*
In Binas tabel 18 vind je: $n_{\text{lucht}}$ = 1,00 en $n_{\text{perspex}}$ = 1,50. De lichtstraal gaat van lucht (stof 1) naar perspex (stof 2). Dus $n_1$ = 1,00 en $n_2$ = 1,50.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

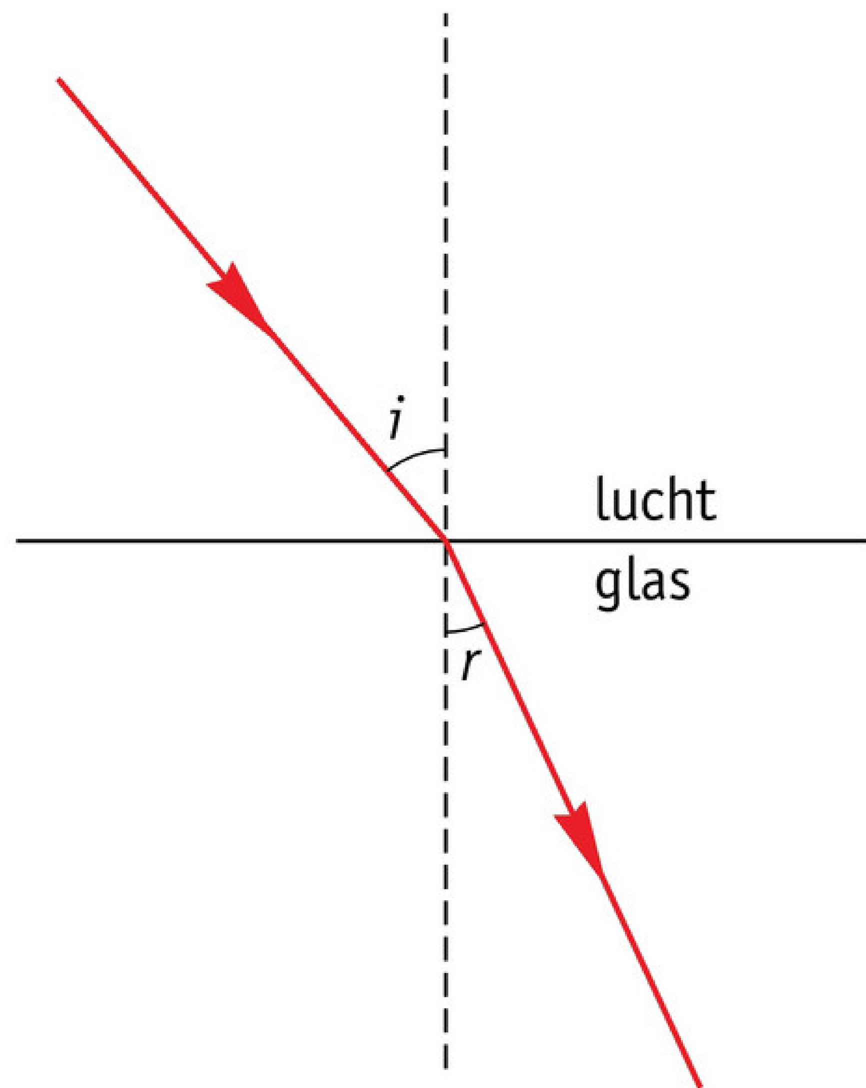
$$\frac{\sin 40°}{\sin r} = \frac{1,50}{1,00}$$

$$\sin r = \frac{\sin 40°}{1,50}\text{, dus } r = 25°$$

De brekingshoek is dus 25°.

Je ziet in voorbeeldopgave 3 dat als een lichtstraal van een stof met een kleine brekingsindex naar een stof met een grote(re) brekingsindex gaat, de brekingshoek kleiner is dan de invalshoek (figuur 15). Je kunt dit ook anders formuleren:
- Gaat licht van een stof met een kleine brekingsindex naar een stof met een grotere brekingsindex, dan breekt de lichtstraal naar de normaal toe.

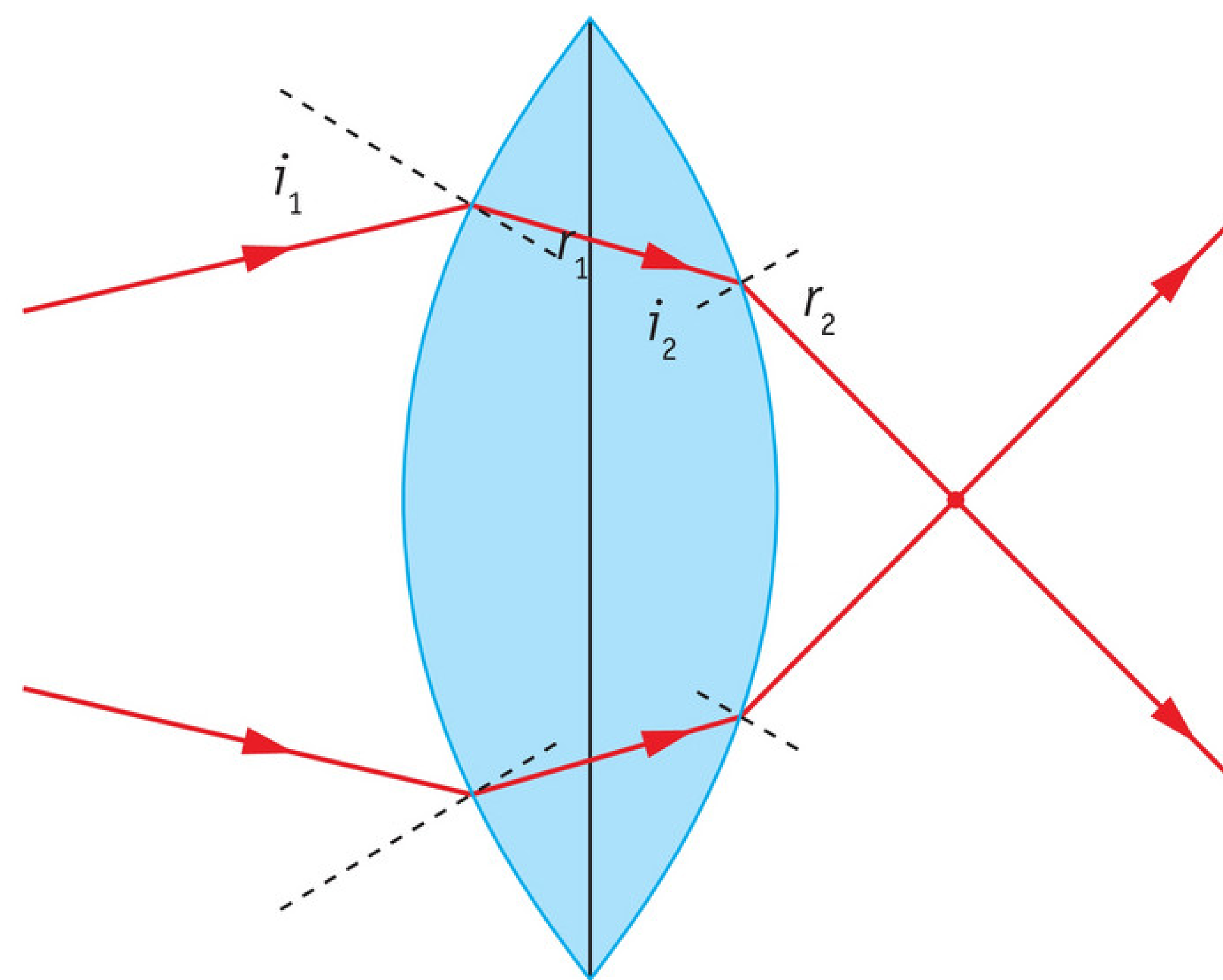
Het omgekeerde geldt ook:
- Gaat licht van een stof met een grote brekingsindex naar een stof met een kleinere brekingsindex, dan breekt de lichtstraal van de normaal af.




▲ **figuur 15** Een lichtstraal breekt op het grensvlak lucht–glas.

### Breking aan een bolvormig oppervlak

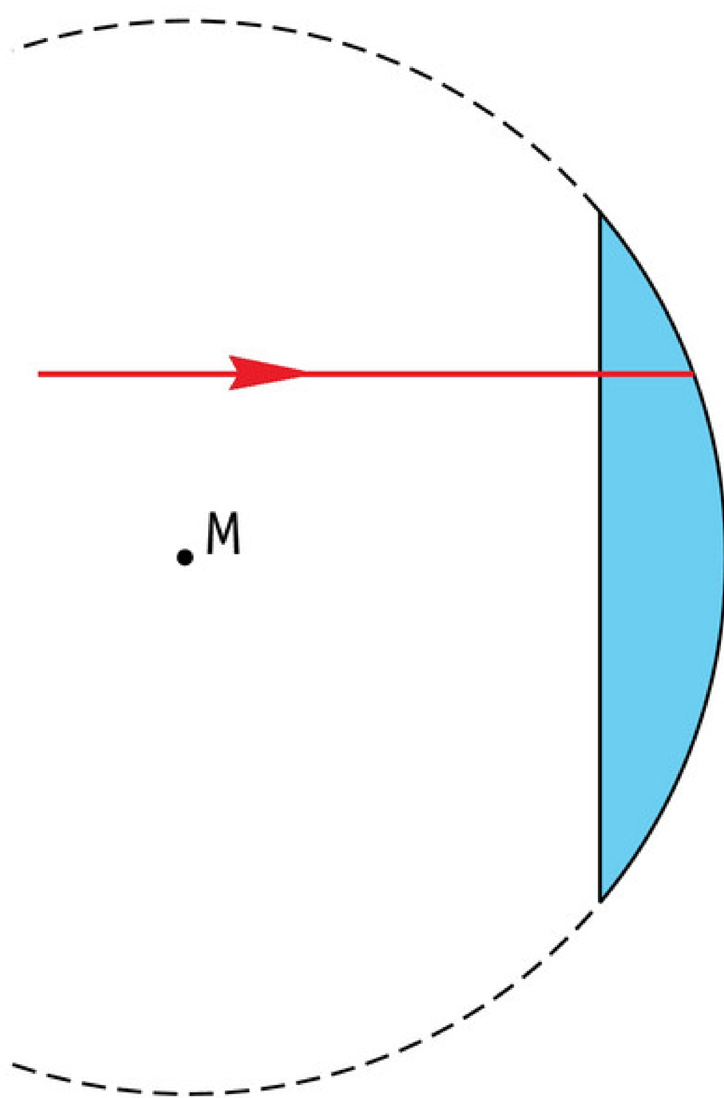
De lenzen die in optische instrumenten worden gebruikt, zijn gemaakt van doorzichtig materiaal, bijvoorbeeld glas of plastic. De werking van een lens is te begrijpen aan de hand van de wet van Snellius. In figuur 16 zie je dat de twee invallende lichtstralen twee keer worden gebroken:
- De stralen breken naar de normaal toe bij het binnentreden van de lens.
- De stralen breken van de normaal af bij het verlaten van de lens.




▲ **figuur 16** breking bij een bolle lens

Daar waar de lichtstralen samenkomen, wordt een beeld gevormd (geprojecteerd). Dit beeld kun je zien als je op die plaats een vel papier of je hand houdt.

In figuur 17 zie je een lichtstraal in lucht die op een platbolle glazen lens valt. Zo'n lens heeft één plat oppervlak en één gekromd oppervlak. Het gekromde oppervlak van het glas is een gedeelte van een bol met middelpunt M. De invallende lichtstraal zal in dit geval één keer worden gebroken, namelijk aan het gekromde oppervlak. De brekingshoek kun je berekenen met behulp van de wet van Snellius.




▲ **figuur 17** Een lichtstraal valt op een platbolle lens.

**Voorbeeldopgave 4**

In figuur 17 valt een (rode) lichtstraal loodrecht op het platte oppervlak van een platbolle glazen lens. De lichtstraal breekt alleen op het gekromde oppervlak.

**a** Leg uit waarom de lichtstraal niet breekt aan het platte oppervlak van de lens.
**b** Construeer het verdere verloop van de lichtstraal na breking aan het gekromde oppervlak.

*Uitwerking*

**a** In Binas tabel 18 vind je: $n_{lucht}$ = 1,00 en $n_{glas}$ = 1,51. De lichtstraal gaat van lucht (stof 1) naar glas (stof 2), dus $n_1$ = 1,00 en $n_2$ = 1,51. De invalshoek is 0°, want de lichtstraal valt loodrecht in op het oppervlak. Invullen in de wet van Snellius geeft:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin 0°}{\sin r} = \frac{1{,}51}{1{,}00}, \text{ dus } r = 0°$$

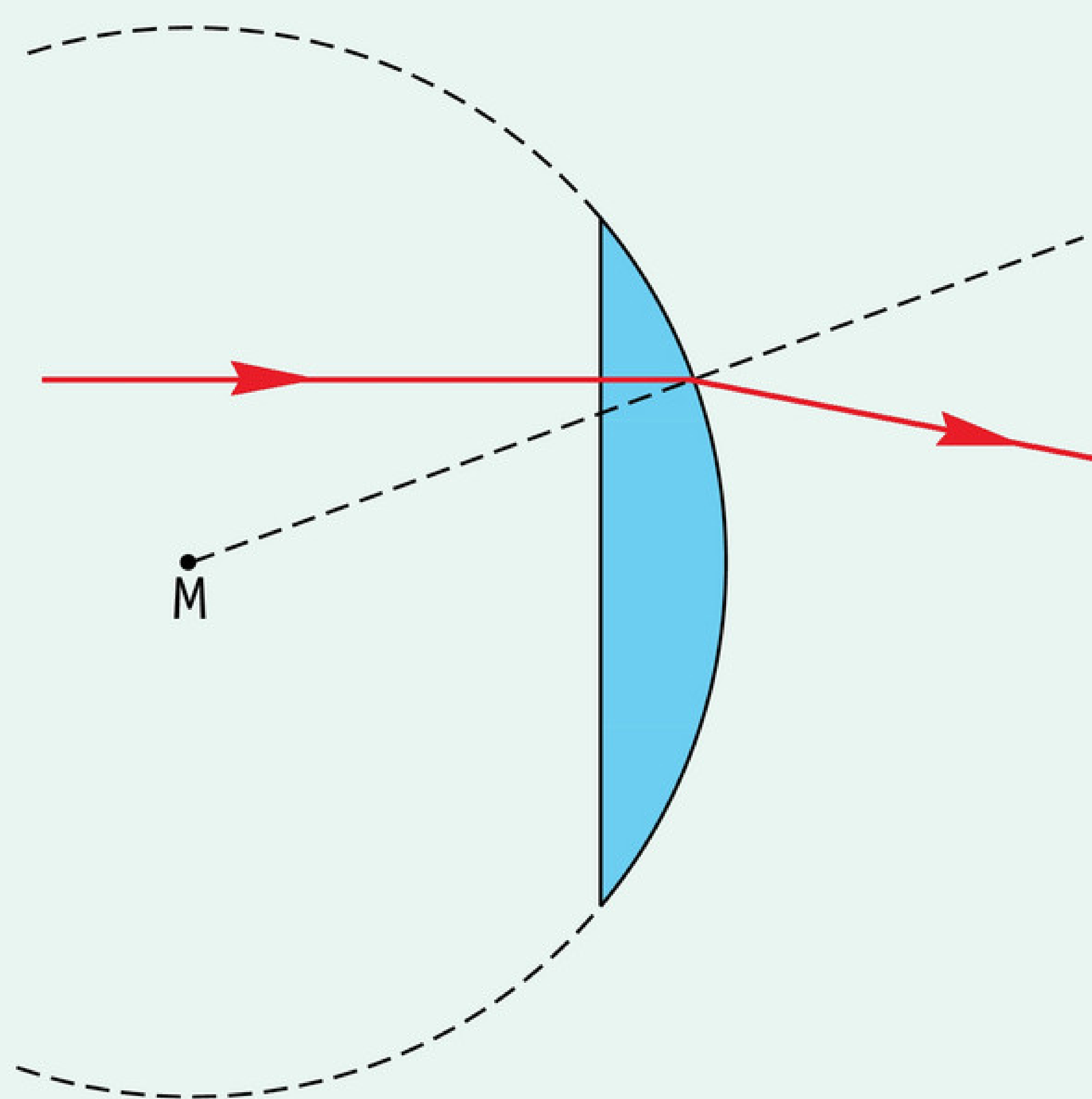
Je ziet dat de brekingshoek ook 0° is. De lichtstraal gaat gewoon rechtdoor zonder te breken.

**b** Eerst teken je de normaal (figuur 18). Bij een boloppervlak met middelpunt M is de normaal een (gestippelde) rechte lijn van middelpunt M naar het punt waar de lichtstraal op het oppervlak valt. De invalshoek is de hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal. In de figuur is dit 20°.
De lichtstraal gaat van glas (stof 1) naar lucht (stof 2). Dus $n_1$ = 1,51 en $n_2$ = 1,00. Invullen van alle gegevens in de wet van Snellius geeft:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin 20°}{\sin r} = \frac{1{,}00}{1{,}51}$$

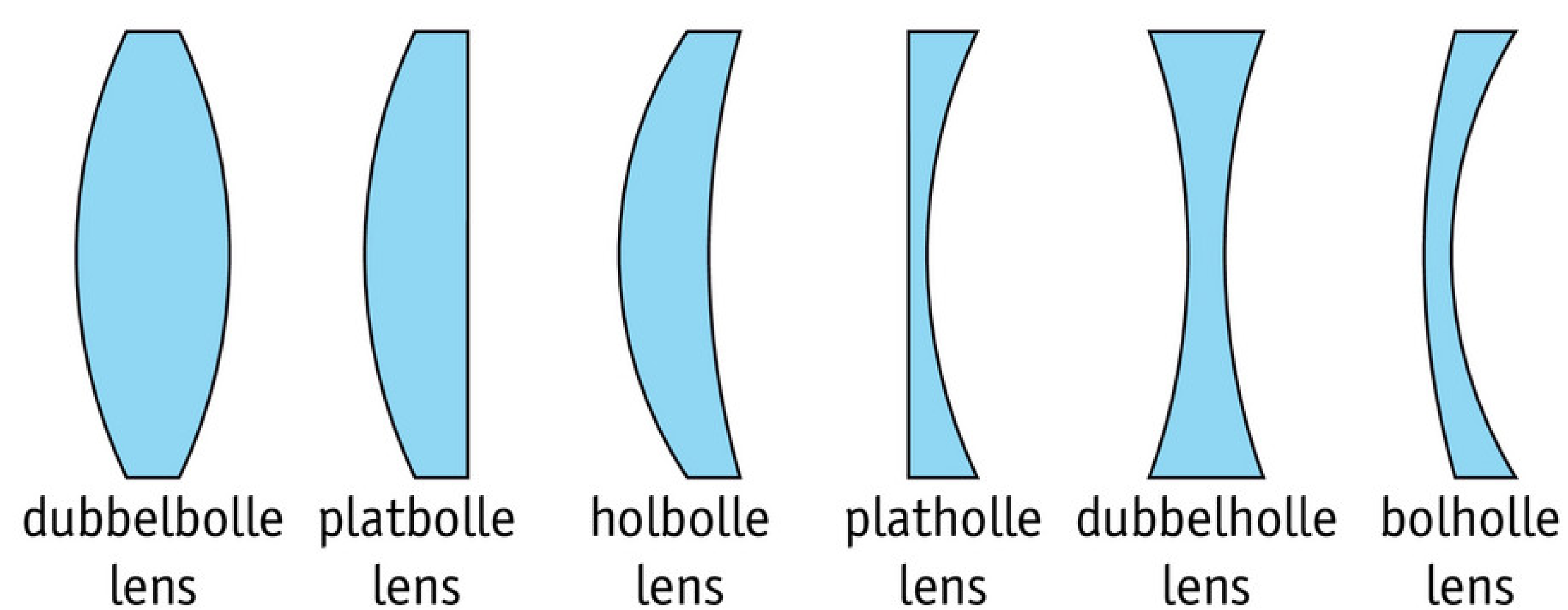
$\sin r = 1{,}51 \times \sin 20°$
$r = 31°$
(De lichtstraal breekt dus van de normaal af.)




▲ **figuur 18** Zo teken je de normaal (stippellijn M).

## Soorten lenzen

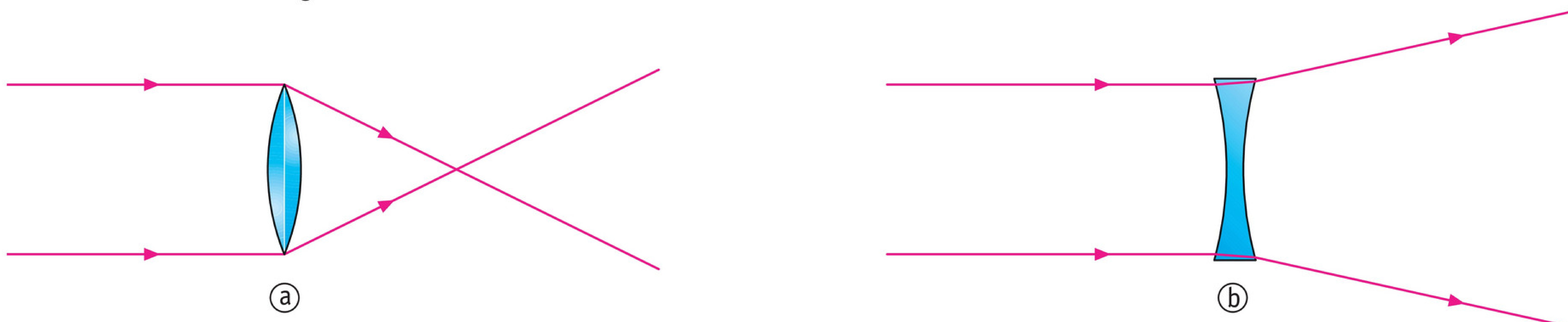
Naast de platbolle lens zijn er ook nog vijf andere lenzen mogelijk (figuur 19). Alle lenzen hebben een ronde omtrek en één of beide oppervlakken zijn gekromd. De twee lensoppervlakken van de lenzen kunnen hol, bol of plat zijn.




▲ **figuur 19** verschillende soorten lenzen

## Convergeren en divergeren

Bolle lenzen noem je ook wel positieve lenzen. Deze lenzen zijn in het midden dikker dan aan de randen. Als een evenwijdige lichtbundel op een bolle lens valt, breekt de lens de lichtstralen naar één punt (figuur 20a). De bundel **convergeert**. Een bolle lens heeft een convergerende werking.

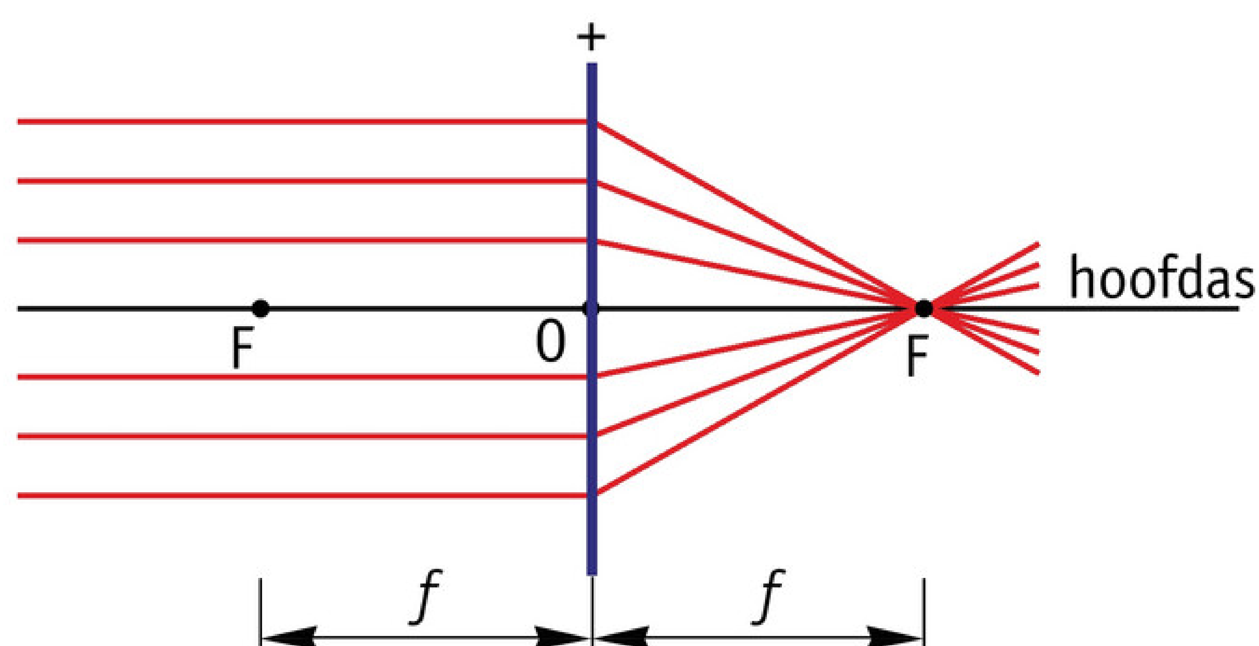



▲ **figuur 20** (a) Een bolle lens convergeert en (b) een holle lens divergeert.

Holle lenzen worden negatieve lenzen genoemd. Deze lenzen zijn aan de randen dikker dan in het midden. Als een evenwijdige lichtbundel op een holle lens valt, gaan de lichtstralen van elkaar af (figuur 20b). De bundel **divergeert**. Een holle lens heeft een divergerende werking. In de volgende paragrafen zullen alleen positieve lenzen aan bod komen.

## Bolle lens

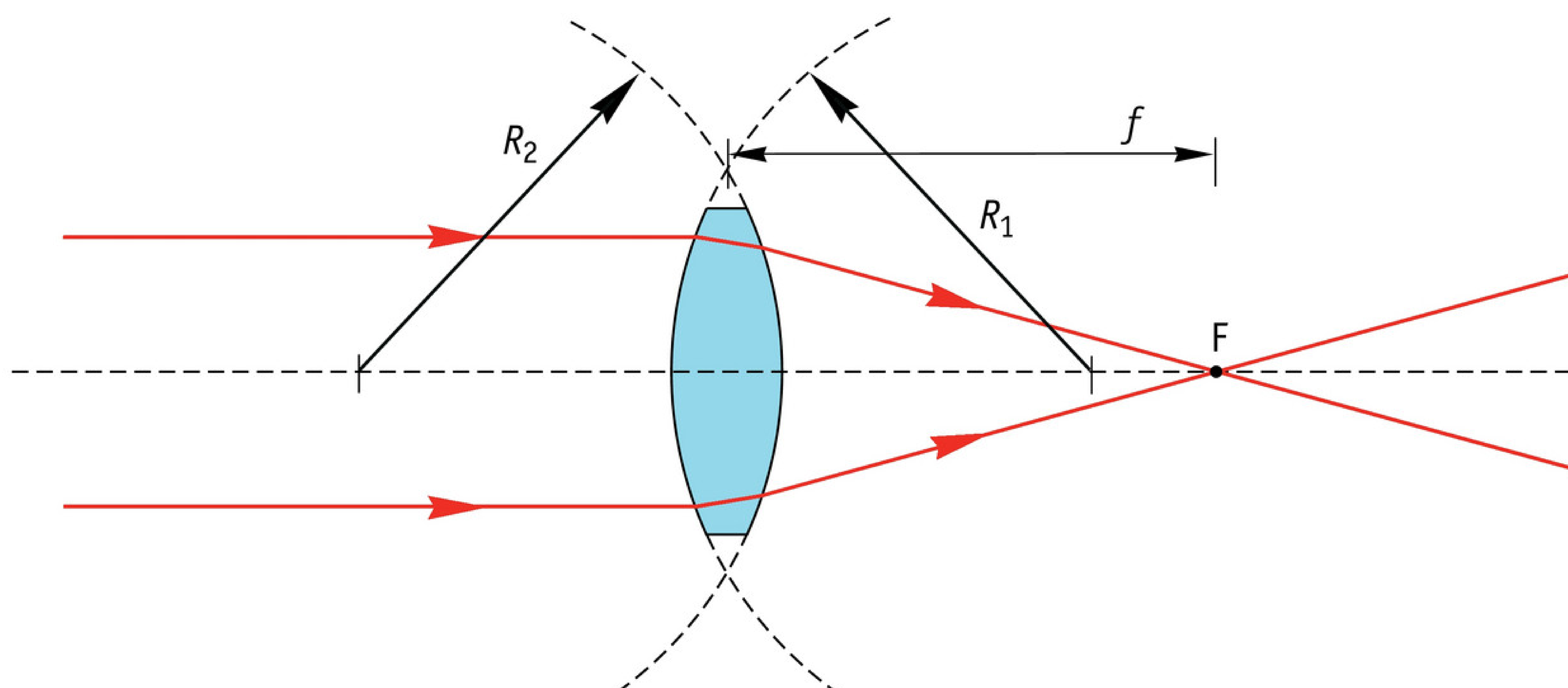
Lenzen worden in tekeningen vereenvoudigd weergegeven als een verticale lijn (figuur 21). Aan het +-teken van de verticale lijn zie je dat het om een bolle (positieve) lens gaat. Loodrecht door het midden van de lens loopt de **hoofdas**. De hoofdas snijdt de lens in het **optisch middelpunt O**. Als lichtstralen, bijvoorbeeld zonlicht, evenwijdig aan de hoofdas op een positieve lens vallen, komen deze achter de lens in één punt samen. Dit punt heet het **brandpunt F**. Houd je in het brandpunt een papiertje, dan zal door bundeling van het zonlicht de temperatuur in dit punt zo hoog worden dat het papiertje gaat branden. De afstand tussen het midden van de lens tot het brandpunt is de **brandpuntsafstand *f***.
Draai je de lens om, dan zul je zien dat hetzelfde gebeurt. Ook nu gaan de evenwijdige lichtstralen aan de hoofdas na de lens door één punt. Een lens heeft dus aan beide kanten een brandpunt. Beide brandpunten liggen op dezelfde afstand van het optisch middelpunt van de lens. Je mag hieruit concluderen dat lichtstralen omkeerbaar zijn.




▲ **figuur 21** evenwijdige lichtstralen op een bolle lens

## Het brandpunt

In figuur 22 zie je een dubbelbolle lens. Twee lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas vallen op het gekromde oppervlak links van de lens. Dit oppervlak is een deel van een boloppervlak. De straal van deze bol noem je de kromtestraal $R_1$. In het glas worden beide lichtstralen gebroken. Na breking treffen de lichtstralen het gekromde oppervlak rechts van de lens. Ook dit oppervlak is bol. De kromtestraal van deze bol is $R_2$. Bij uittreding naar de lucht worden de lichtstralen voor de tweede keer gebroken. De lichtstralen komen uiteindelijk samen in het brandpunt F.

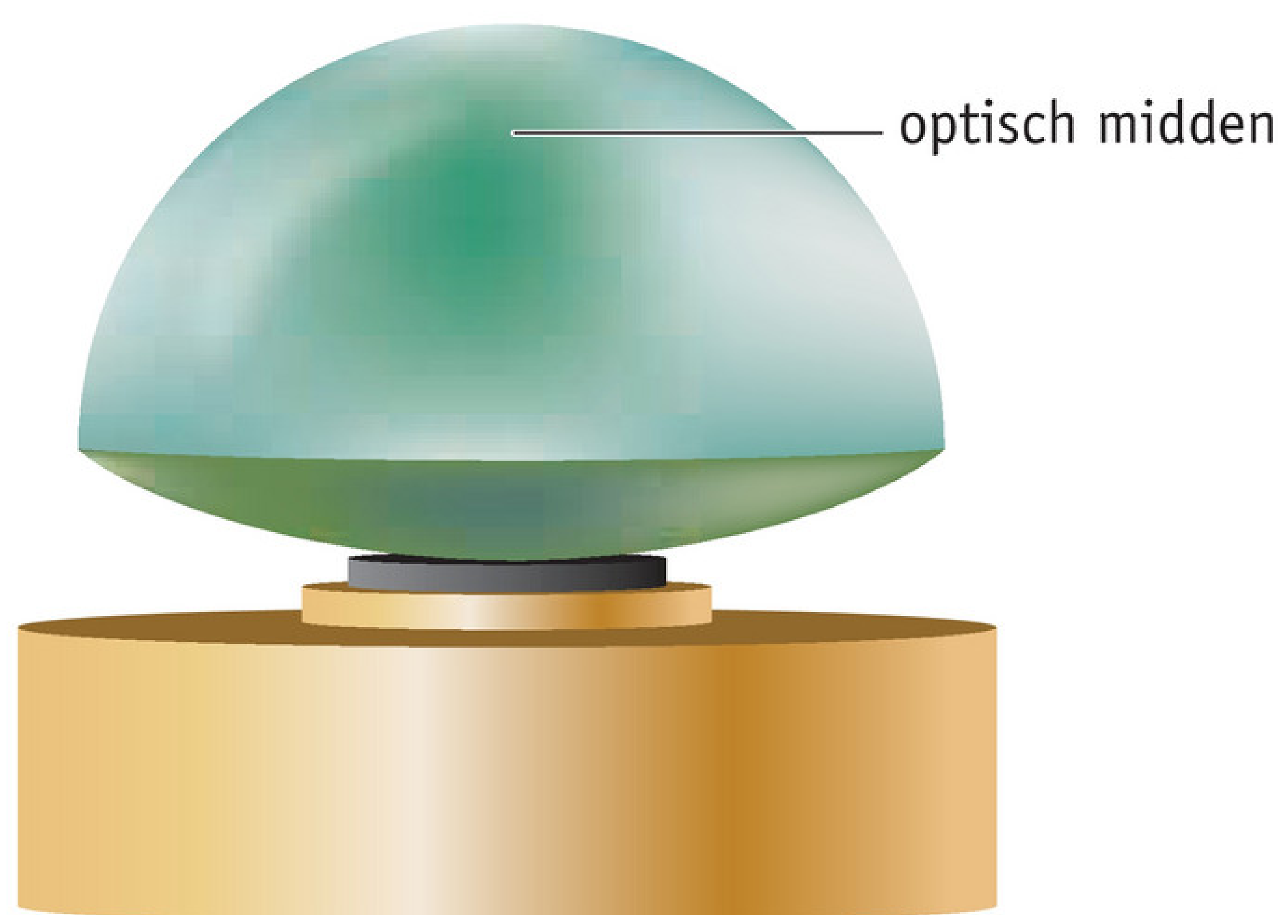



▲ **figuur 22** een dubbelbolle lens met kromtestralen $R_1$ en $R_2$

De plaats van het brandpunt F hangt af van de sterkte van de lens. Een bollere lens heeft een grotere convergerende werking en breekt de lichtstralen dus meer. Het brandpunt ligt dichter bij de lens. Een bollere lens heeft dus een kleinere brandpuntsafstand.
De brandpuntsafstand hangt af van de kromtestralen $R_1$ en $R_2$, maar ook van de brekingsindex $n$ van het materiaal van de lens:

- Als de kromtestraal groter is, is het boloppervlak ook groter. De lens is minder bol en heeft een grotere brandpuntsafstand.
- Als de brekingsindex kleiner is, breken de lichtstralen minder sterk. De lens heeft een grotere brandpuntsafstand.

Als een lens twee verschillende kromtestralen heeft, betekent dit dat de ene kant meer gekromd is dan de andere kant. Toch liggen de brandpunten van beide kanten even ver van het optisch middelpunt O. Dit komt doordat het optisch middelpunt dan niet precies in het midden van de lens ligt, maar iets meer aan de kant waar het oppervlak het meest gekromd is (figuur 23).




▲ **figuur 23** een lens die de Vikingen in de elfde eeuw als loep gebruikten

## Sterkte van een lens

Een bollere lens heeft een kleinere brandpuntsafstand en breekt de lichtstralen meer dan een plattere lens. Je zegt dan dat de bollere lens sterker is. De sterkte van een lens bereken je met:

$$S = \frac{1}{f}$$

Hierin is:

- $S$ de sterkte van de lens in dioptrie (dpt);
- $f$ de brandpuntsafstand in meter (m).

Zo heeft een brillenglas met een brandpuntsafstand van 50 cm een sterkte van:

$$S = \frac{1}{f} = \frac{1}{0{,}50} = 2{,}0 \text{ dpt}$$

## De lenzenmakersformule

De brandpuntsafstand kun je berekenen met de **lenzenmakersformule**:

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Hierin is:

- $f$ de brandpuntsafstand in meter (m);
- $n$ de brekingsindex van het materiaal waarvan de lens is gemaakt (geen eenheid);
- $R_1$ en $R_2$ de kromtestralen van beide lensoppervlakken in meter (m).

***Opmerking***
Je mag voor $f$, $R_1$ en $R_2$ ook een andere eenheid gebruiken (bijvoorbeeld centimeter), als je dit maar consequent voor alle drie de grootheden doet.

**Voorbeeldopgave 5**

In figuur 22 breken twee lichtstralen door een dubbelbolle lens. De figuur is op ware grootte. Bepaal de brekingsindex van het materiaal waaruit de lens bestaat door gebruik te maken van de lenzenmakersformule.

*Uitwerking*
Gebruik de lenzenmakersformule en vul de benodigde gegevens in:

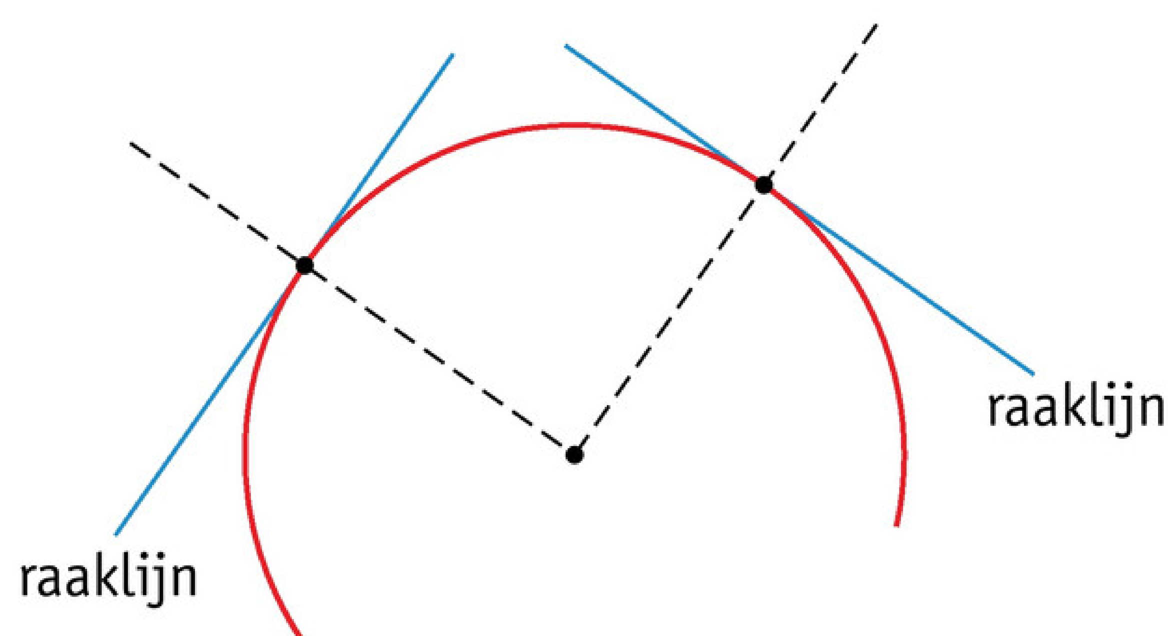
$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Meet $f$ en de kromtestralen $R_1$ en $R_2$ op in figuur 22.

$$\frac{1}{6{,}0} = (n-1)\left(\frac{1}{2{,}9} + \frac{1}{3{,}2}\right)$$

$0{,}167 = (n-1) \cdot 0{,}657$
$(n-1) = 0{,}254$
$n = 1{,}25$
De brekingsindex van het materiaal waarvan de lens is gemaakt, is $n = 1{,}25$.

De kromtestraal kun je gemakkelijk opmeten als het middelpunt van de bolcirkel is getekend. Vaak is het middelpunt echter niet getekend of gegeven en moet je het zelf bepalen, bijvoorbeeld tijdens een practicum. Handig is dan om het gekromde oppervlak van de lens over te tekenen op papier. Neem dan twee punten op de cirkel en teken in beide punten een raaklijn. Een raaklijn aan een cirkel staat namelijk loodrecht op de lijn door het middelpunt van die cirkel (figuur 24).




▲ **figuur 24** Zo bepaal je het middelpunt van een cirkel.

**Onthoud!**

- Bij breking van een lichtstraal geldt de wet van Snellius.
- Een evenwijdige lichtbundel gaat bij een positieve lens na breking door het brandpunt.
- Een lens heeft twee brandpunten; de brandpuntsafstand is de afstand van het optisch middelpunt van de lens tot het brandpunt.
- De sterkte van de lens bereken je met $S = \frac{1}{f}$; een bollere lens is sterker (heeft een kleinere brandpuntsafstand) dan een minder bolle lens.
- De brandpuntsafstand kun je berekenen met de lenzenmakersformule.

## Opdrachten

**6** Vakbegrippen bij lenzen
Om de werking van lenzen te begrijpen, moet je een aantal vakbegrippen kennen.
**a** Verklaar de term ‘brandpunt’.
**b** Geef de wet van Snellius en leg uit wat de grootheden in de formule betekenen.
**c** Leg uit wat wordt bedoeld wordt met de begrippen ‘convergerende’ en ‘divergerende lichtbundel’.

**7** Een vloeistoflens
Een regendruppel kun je beschouwen als een dubbelbolle vloeistoflens. Een lichtstraal valt vanuit lucht evenwijdig aan de hoofdas op de regendruppel.
Kies steeds het juiste alternatief.
**a** Hoe boller de regendruppel (lens), hoe *kleiner* / *groter* de invalshoek.
**b** Hoe boller de regendruppel (lens), hoe *kleiner* / *groter* de brekingshoek.
**c** Hoe boller de regendruppel (lens), hoe *kleiner* / *groter* de sterkte van de lens.

**8** Zwembad
In een zwembad zitten onder water enkele lampen. Een lichtstraal gaat vanuit een lamp door het water en wordt gebroken bij het wateroppervlak. De hoek van inval is 20°, de hoek van breking is 27°.
Bereken de brekingsindex van het water.

**9** Water en ijs
Een (gele) lichtstraal gaat van water naar ijs. De hoek van breking is 27,0°.
Bereken de hoek van inval.

**10** Lenzen tekenen
Teken een dubbelbolle lens en geef hierin het volgende aan: hoofdas, optisch middelpunt, brandpunt en brandpuntsafstand.

**11** Dubbelbolle lens
Beide oppervlakken van een dubbelbolle lens hebben een straal van 44,0 cm met een brandpuntsafstand van 30,5 cm.
**a** Bereken de brekingsindex van het materiaal van deze lens.
**b** Bereken de sterkte van de lens.

**+12** Een lens van kwarts
Jasper wil van gesmolten kwarts een platbolle lens maken met een brandpuntsafstand van 12,0 cm.
Bereken de kromtestraal die het bolle lensoppervlak dan moet krijgen.

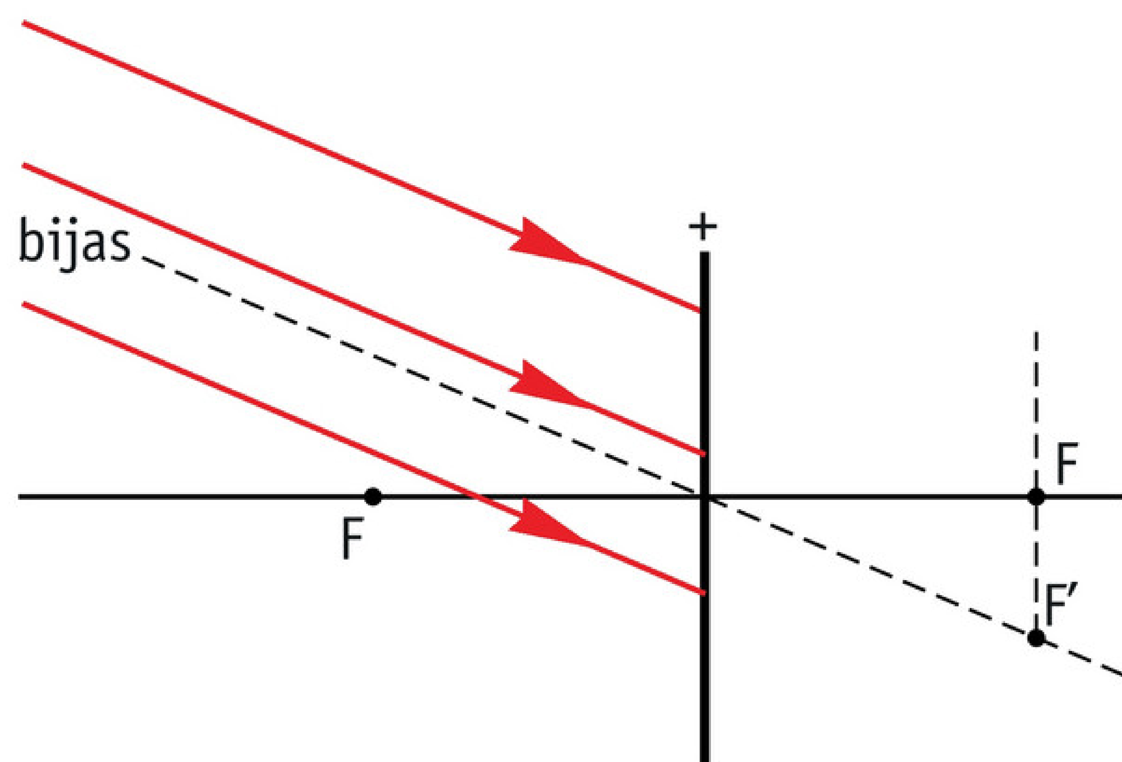
# 3 Constructiestralen en beeldvorming

In deze paragraaf leer je:
- beelden construeren bij positieve lenzen;
- eigenschappen van beelden kennen.

Bij een bolle lens gaan lichtstralen die evenwijdig aan de hoofdas lopen, na breking door het brandpunt achter de lens. In deze paragraaf wordt behandeld hoe lichtstralen worden gebroken die voor de lens niet evenwijdig aan de hoofdas lopen.

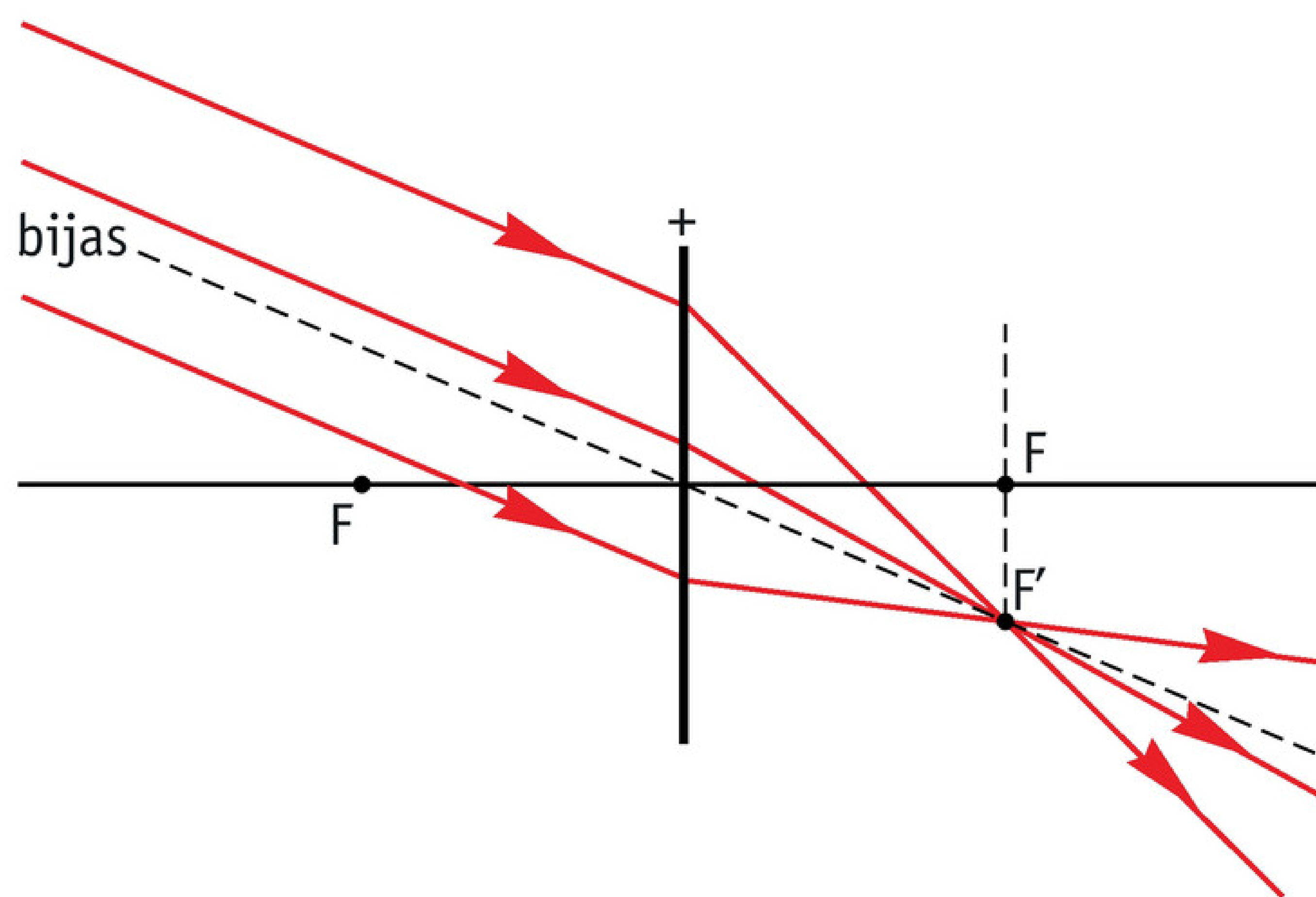
## Bijas en bijbrandpunt

Evenwijdige lichtstralen die schuin op een lens vallen, gaan niet evenwijdig aan de hoofdas, maar aan de **bijas** (figuur 25). Deze as gaat ook door het optisch middelpunt van de lens. Achter de lens komen de lichtstralen in één punt samen: het **bijbrandpunt F'**. Dit punt ligt recht boven of onder het brandpunt.




▲ **figuur 25** De bijas is een rechte lijn door het optisch middelpunt van een lens.

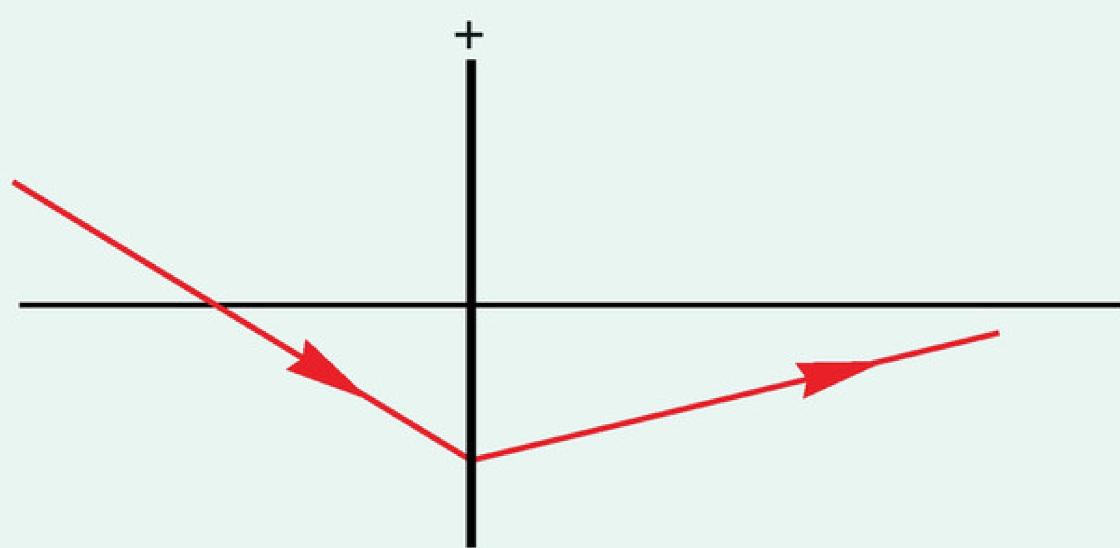
Het tekenen van een bijas kan handig zijn voor de constructie van het beeld (figuur 26), of als je de plaats van het brandpunt van de lens wilt vinden. Zie voorbeeldopgave 6 en 7.




▲ **figuur 26** Met behulp van de bijas is het eenvoudiger een beeld te construeren.

**Voorbeeldopgave 6**

Een lichtstraal valt op een bolle lens en wordt gebroken (figuur 27).

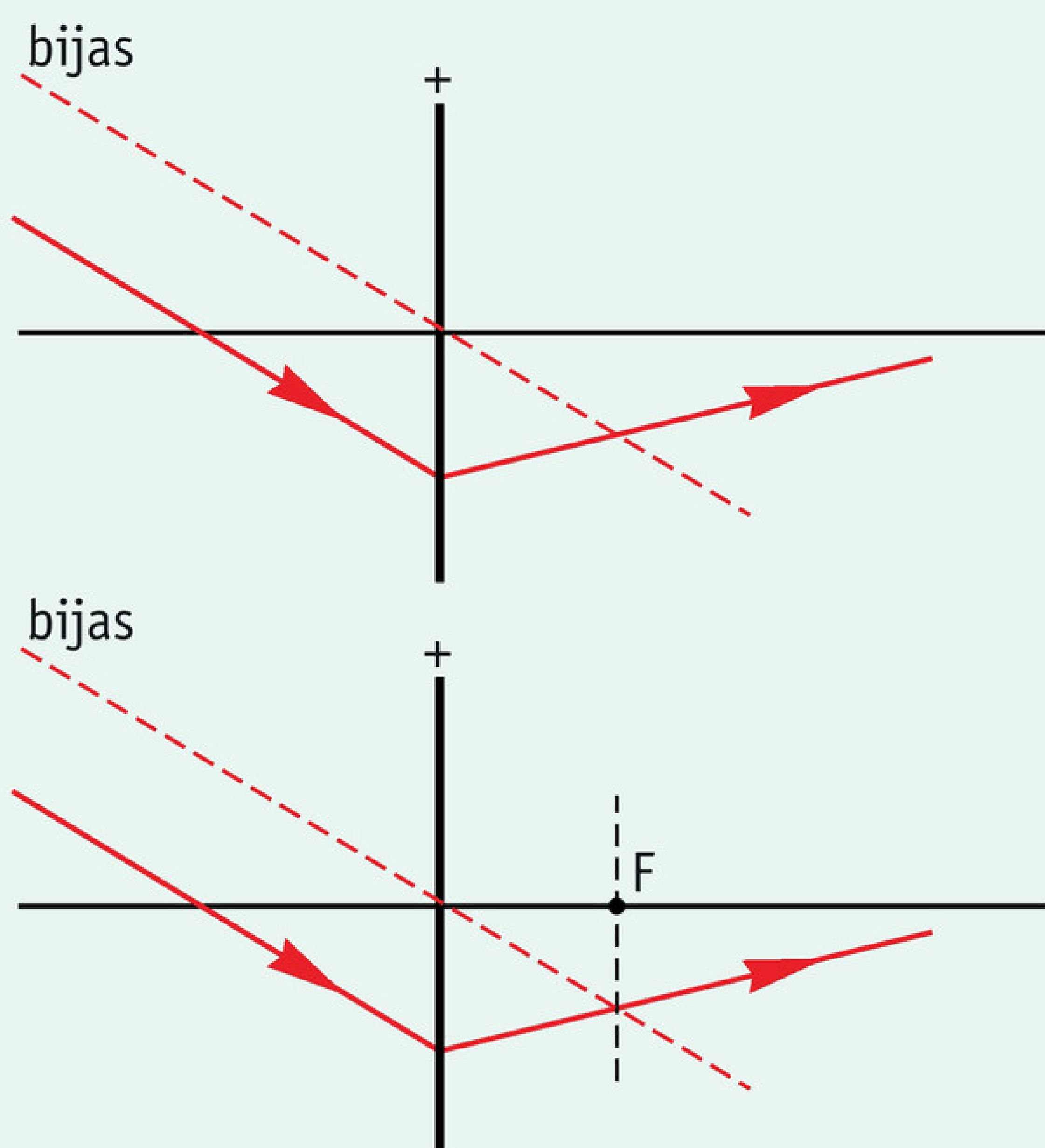



▲ **figuur 27** Een lichtstraal wordt gebroken door een bolle lens.

Bepaal door middel van een constructie de plaats van het brandpunt.

*Uitwerking*

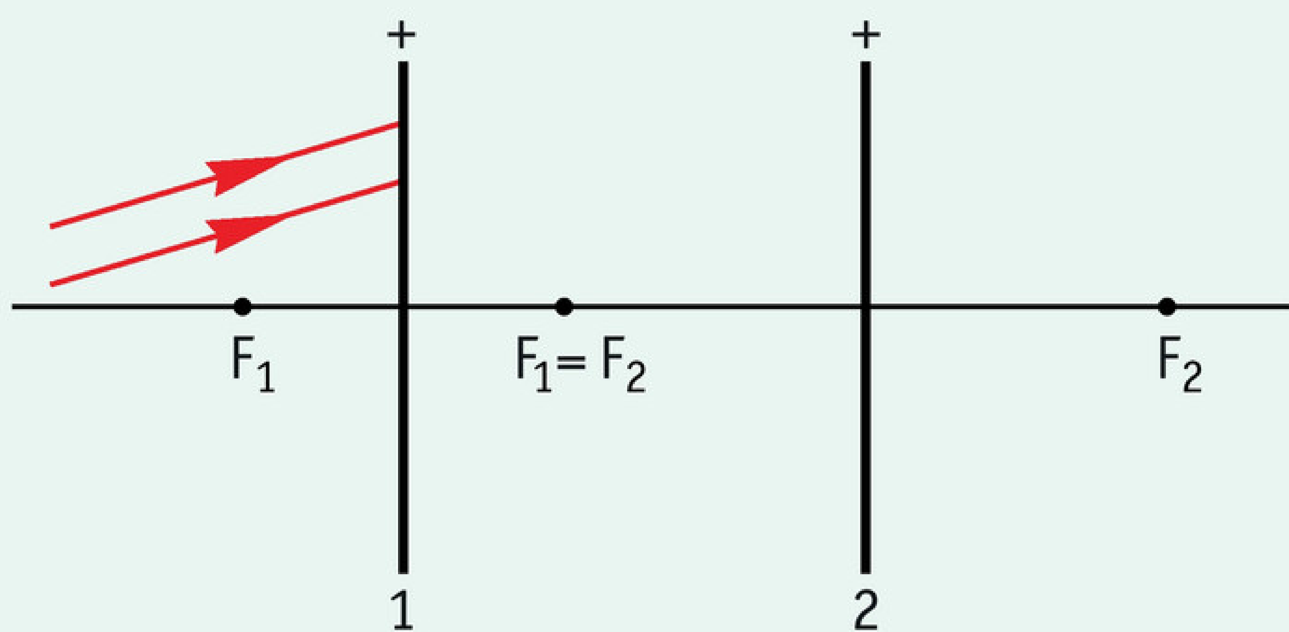
Stippel evenwijdig aan de binnenvallende lichtstraal de bijas (hulplijn). Deze as gaat door het optisch middelpunt. In het punt achter de lens, waar de bijas de lichtstraal snijdt, ligt het bijbrandpunt. Recht boven het bijbrandpunt ligt het brandpunt F van de lens (figuur 28). (Aan de andere kant van de lens op even grote afstand ligt dan ook een brandpunt.)




▲ **figuur 28** bepaling van het brandpunt van een bolle lens

**Voorbeeldopgave 7**

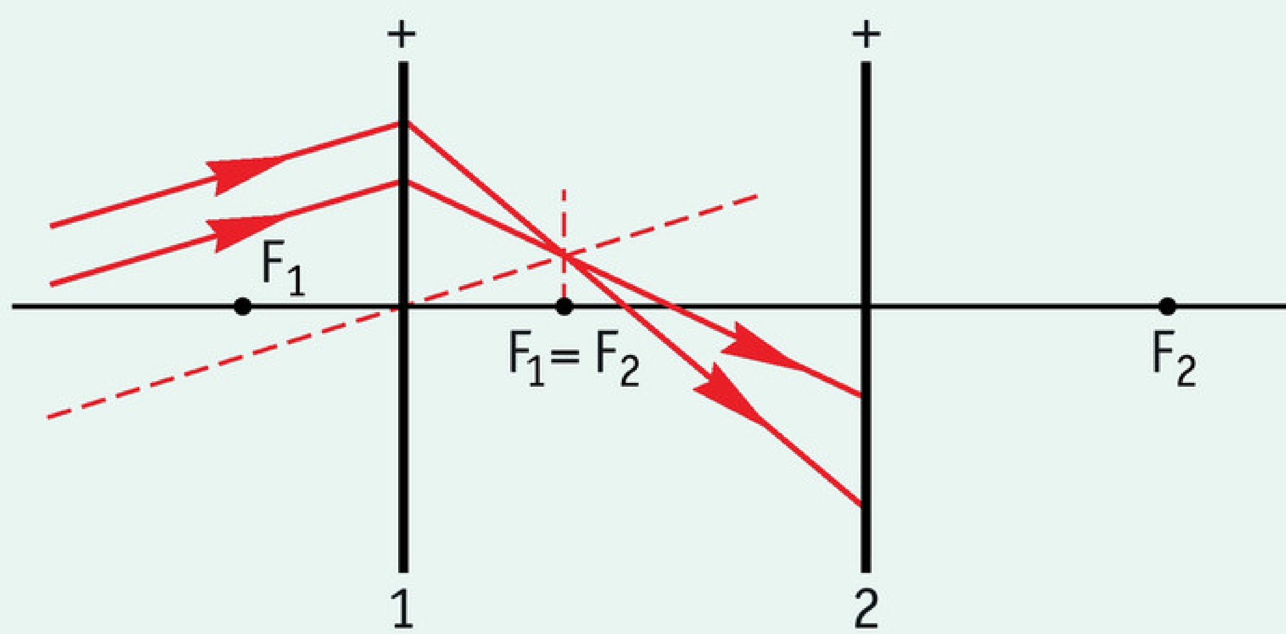
Twee lichtstralen vallen evenwijdig op lens 1 (figuur 29). Rechts hiervan staat lens 2. De brandpunten van beide lenzen vallen samen ($F_1 = F_2$).



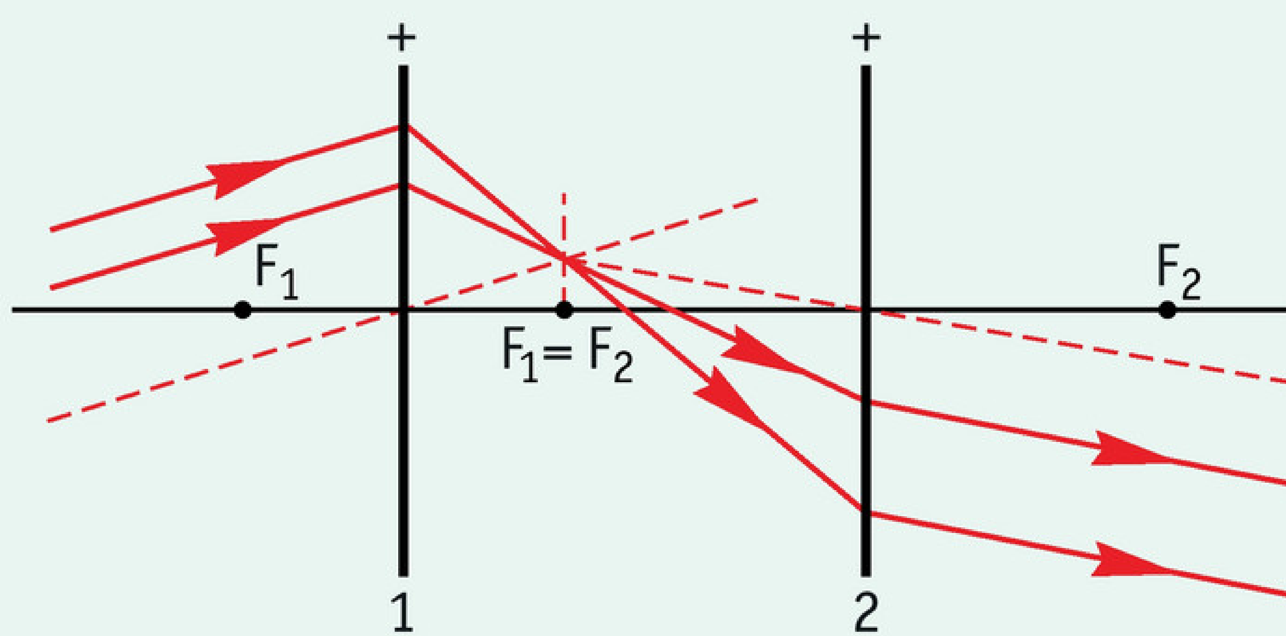

▲ **figuur 29** Twee evenwijdige lichtstralen vallen op lens 1.

Teken de verdere loop van de twee lichtstralen tussen beide lenzen en achter lens 2.

*Uitwerking*
De lichtstralen vallen schuin en evenwijdig in op lens 1. Stippel een bijas evenwijdig aan deze lichtstralen. Recht boven de gezamenlijke brandpunten $F_1$ en $F_2$ ligt het bijbrandpunt. Teken beide lichtstralen door het bijbrandpunt (figuur 30).
De lichtstralen in dit bijbrandpunt kun je opvatten als een voorwerpspunt waaruit twee lichtstralen komen. Dit voorwerpspunt ligt boven het brandpunt van lens 2. Lichtstralen vanuit een brandpunt gaan achter de lens evenwijdig aan de hoofdas. In dit geval gaan lichtstralen vanuit het bijbrandpunt achter de lens evenwijdig aan de bijas. Teken vanuit het voorwerpspunt een bijas door het optisch middelpunt van lens 2 (figuur 31). De twee lichtstralen gaan achter lens 2 evenwijdig hieraan.




▲ **figuur 30** de loop van de lichtstralen na lens 1

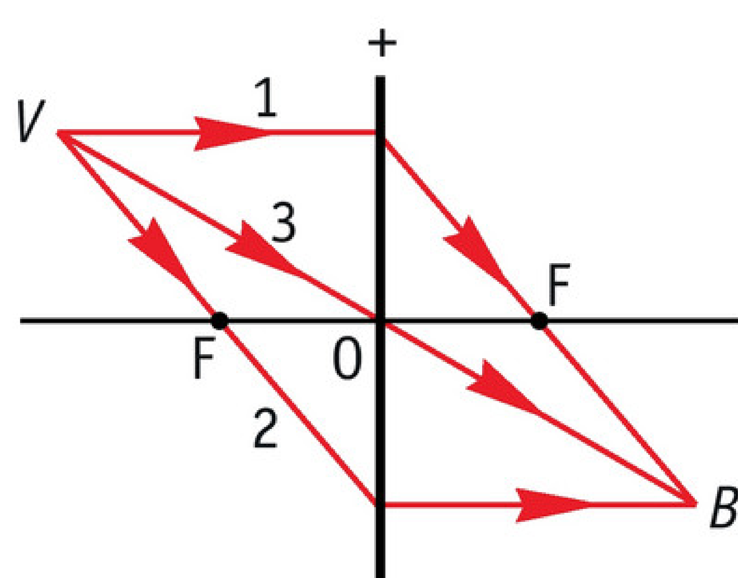



▲ **figuur 31** de loop van de lichtstralen door de lenzen

## Constructie van het beeld

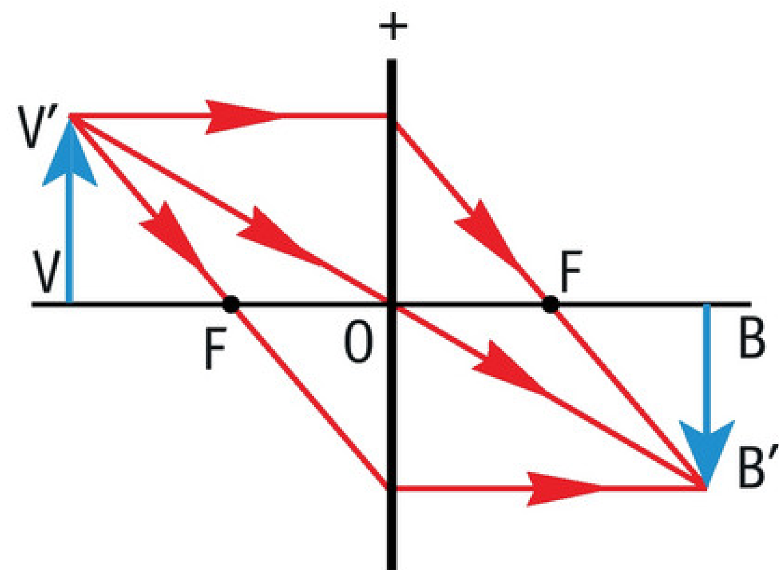
Plaats je een voorwerp voor een lens, dan kan de lens hiervan een beeld vormen. De grootte en plaats van dit beeld kun je bepalen door middel van **constructiestralen**. Drie constructiestralen zijn bijzonder, omdat je hiermee gemakkelijk het beeld kunt tekenen.
Een voorwerp bestaat uit heel veel voorwerpspunten V. Doordat van elk voorwerpspunt heel veel lichtstralen komen, kan een lens van elk voorwerpspunt een beeldpunt B vormen. Bij het tekenen maak je handig gebruik van drie constructiestralen (figuur 32):

1 Een lichtstraal evenwijdig aan de hoofdas gaat achter de lens door het brandpunt.
2 Een lichtstraal door het brandpunt gaat achter de lens evenwijdig aan de hoofdas.
3 Een lichtstraal door het optisch middelpunt breekt niet en gaat achter de lens in de oorspronkelijke richting verder.



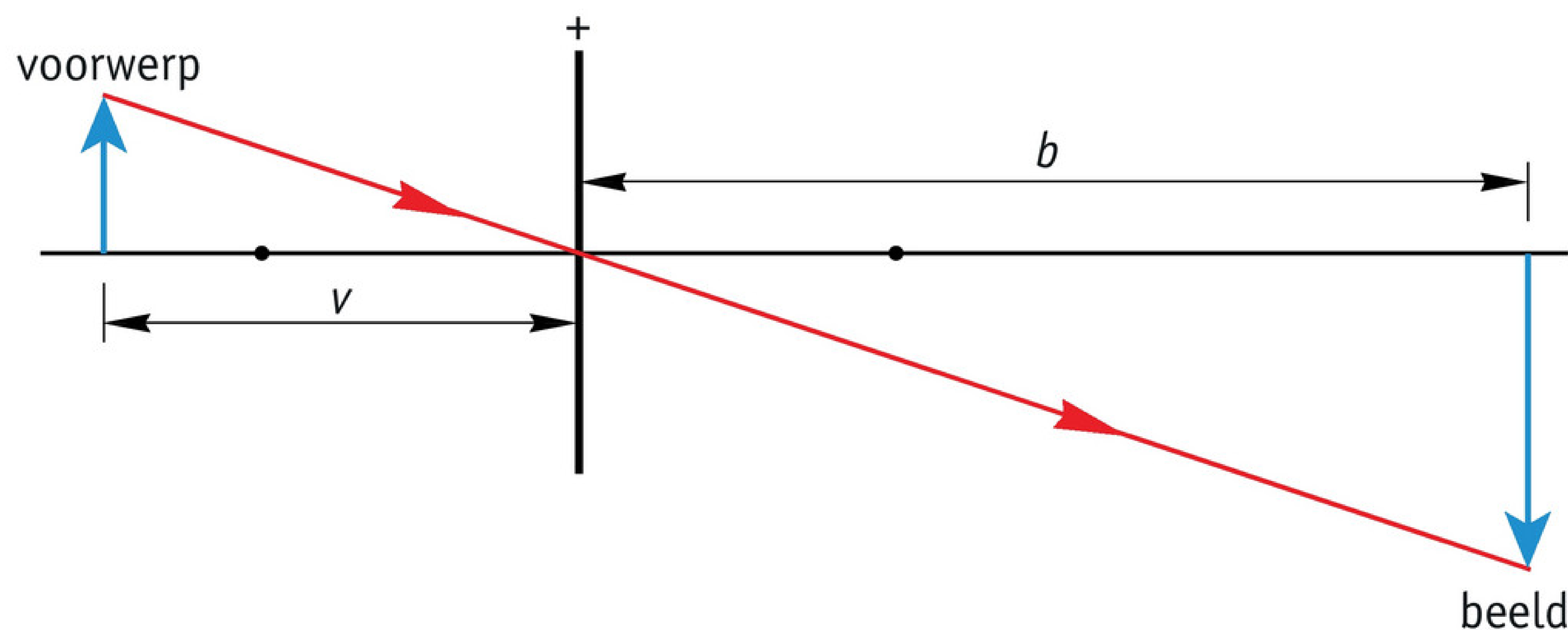

◀ **figuur 32** Met behulp van drie constructiestralen kun je eenvoudig het beeldpunt bepalen.

Met twee van de drie lichtstralen kun je al een beeldpunt bepalen. Het snijpunt van de lichtstralen achter de lens is namelijk het beeldpunt. De derde lichtstraal kun je als controle tekenen. Wil je het hele beeld construeren, dan moet je eigenlijk uit elk voorwerpspunt deze drie constructiestralen tekenen. Het beeld wordt dan opgebouwd uit heel veel beeldpunten. Dit is tijdrovend en bovendien vaak niet nodig, zeker als het voorwerp op de hoofdas staat. In figuur 33 zie je dat je dan met de constructie van één beeldpunt het hele beeld (BB′) van het voorwerp (VV′) al kunt tekenen.




▲ **figuur 33** Zo bepaal je het hele beeld indien het voorwerp op de hoofdas staat.

Met het beeld wordt altijd een *scherp* beeld bedoeld. Plaats je voor of achter de plaats van BB′ een scherm, dan ontstaat een wazig beeld. Voor een scherpe afbeelding zijn twee afstanden belangrijk: de voorwerpsafstand *v* en de beeldafstand *b* (figuur 34).




▲ **figuur 34** voorwerpsafstand *v* en beeldafstand *b*

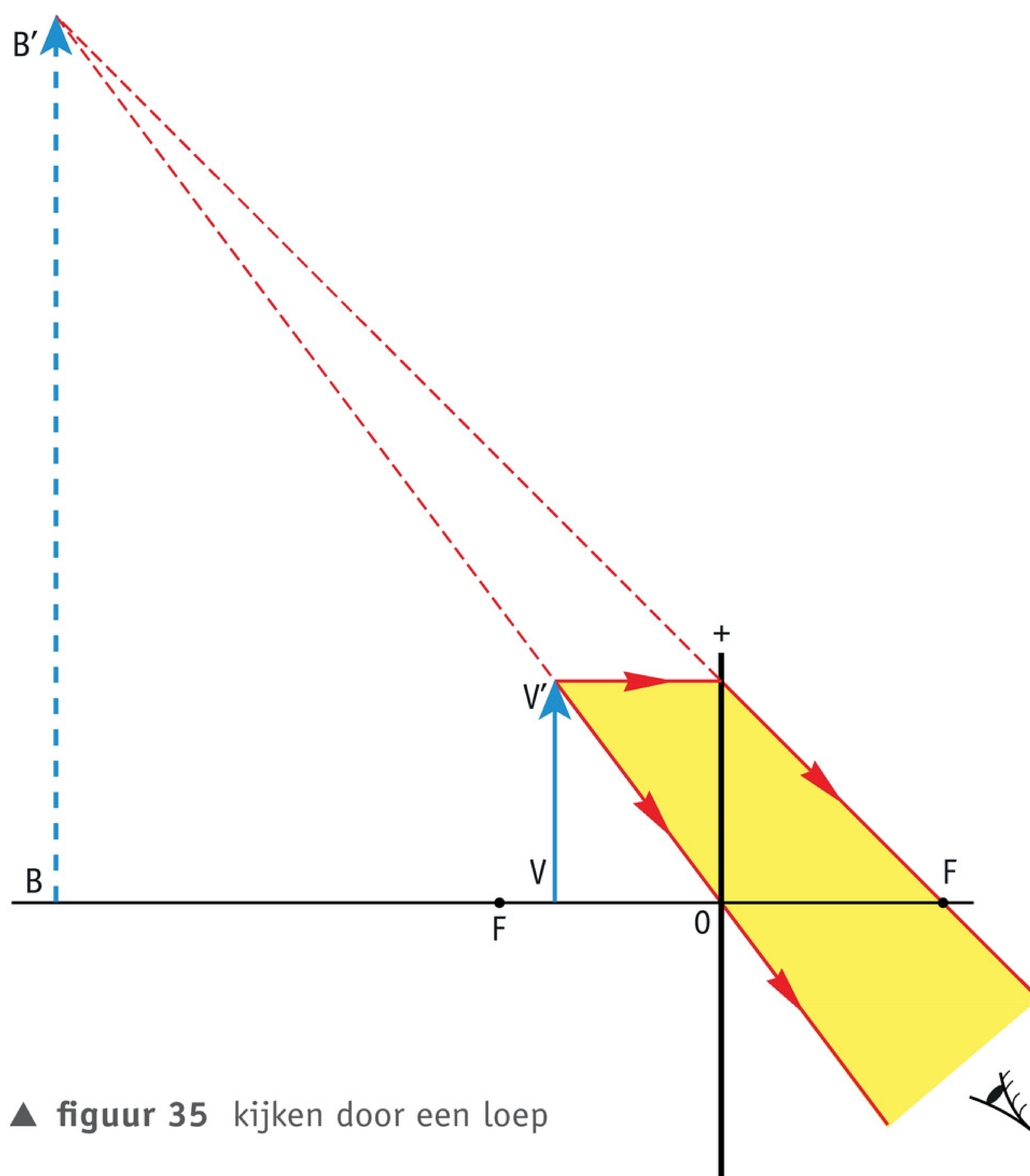
## Constructie van een virtueel beeld

Een loep is een positieve lens. Om een voorwerp groter te zien, plaats je het voorwerp binnen de brandpuntsafstand van de loep. Lichtstralen afkomstig van het voorwerp snijden elkaar aan de andere kant van de lens niet. Er is sprake van een divergente bundel zodat je het beeld niet kunt projecteren op een scherm. Maar als je door de lens naar het voorwerp kijkt, zie je een vergroot beeld. De lichtstralen afkomstig van het voorwerp lijken juist van het virtuele beeld af te komen (figuur 35).

In figuur 35 zie je hoe je een (virtueel) beeld construeert als het voorwerp binnen de brandpuntsafstand van de loep staat:

- Teken de constructiestraal vanuit V′ evenwijdig aan de hoofdas; die gaat na de lens door het brandpunt.
- Teken de constructiestraal vanuit V′ door het optisch middelpunt; die gaat na de lens ongebroken verder.
- Teken beide stralen (gestippeld) terug tot ze elkaar snijden. Bij het snijpunt ligt het beeldpunt B′.

Het hele beeld kun je nu ook construeren (de gestippelde pijl).




▲ **figuur 35** kijken door een loep

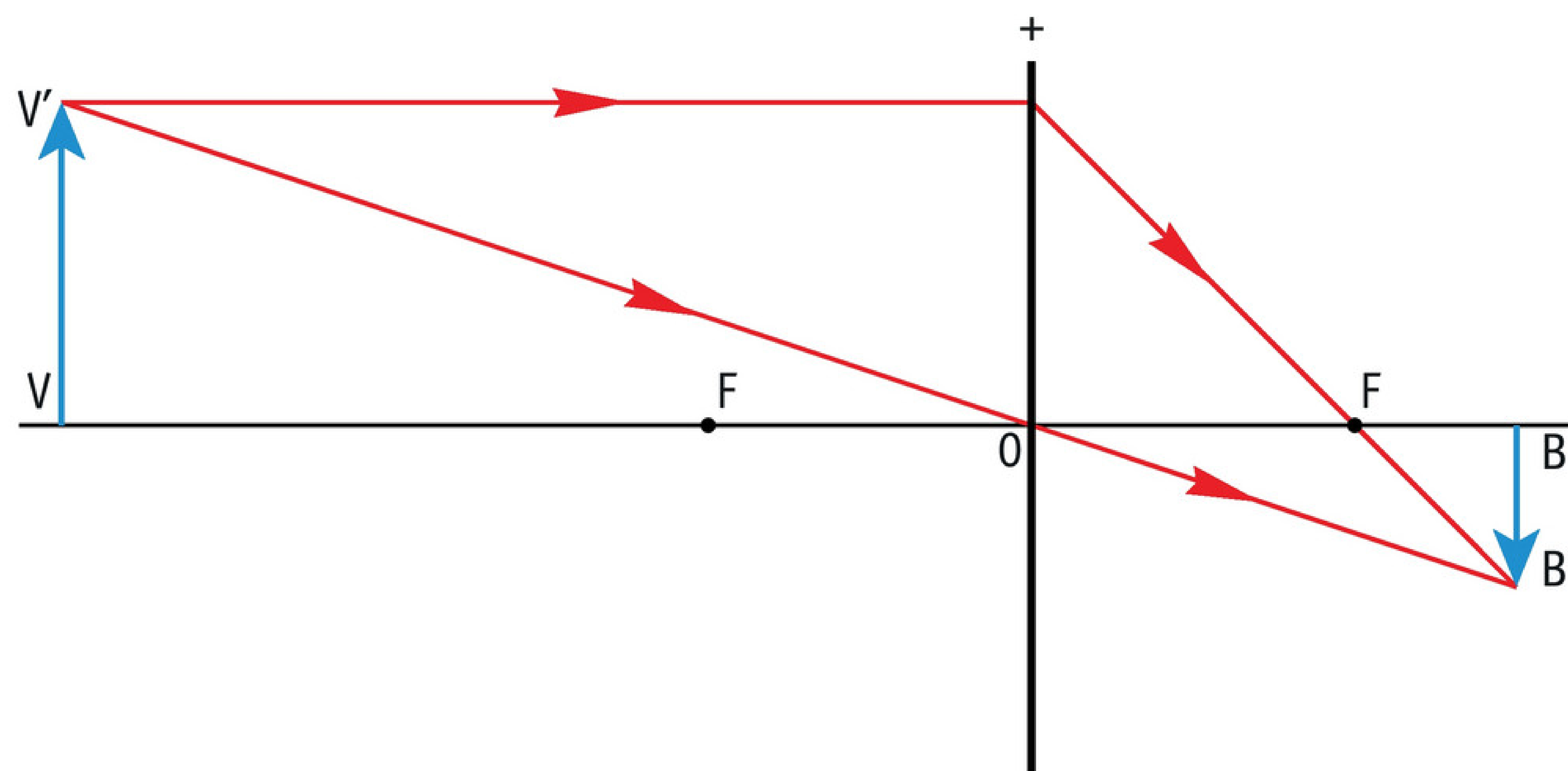
## Eigenschappen van het beeld

Beelden kunnen andere eigenschappen hebben dan de voorwerpen zelf. Ze kunnen vergroot of verkleind, reëel of virtueel en omgekeerd of rechtopstaand zijn. Enkele voorbeelden:

- Het beeld op de lichtgevoelige chip van een digitale fotocamera is kleiner dan het voorwerp zelf, terwijl een beamer een groter beeld projecteert van het voorwerp (het lcd-schermpje).
- Het beeld van de beamer is een reëel beeld, omdat het wordt geprojecteerd op een projectiescherm. Maar het beeld dat je ziet door een vergrootglas is een virtueel beeld. Zo'n beeld kun je niet opvangen op een scherm of een velletje papier en is daardoor een schijnbeeld.
- Het reële beeld van een kaarsje voor een lens is bij projectie omgekeerd, maar het virtuele beeld van een vliegje voor een loep is rechtopstaand.

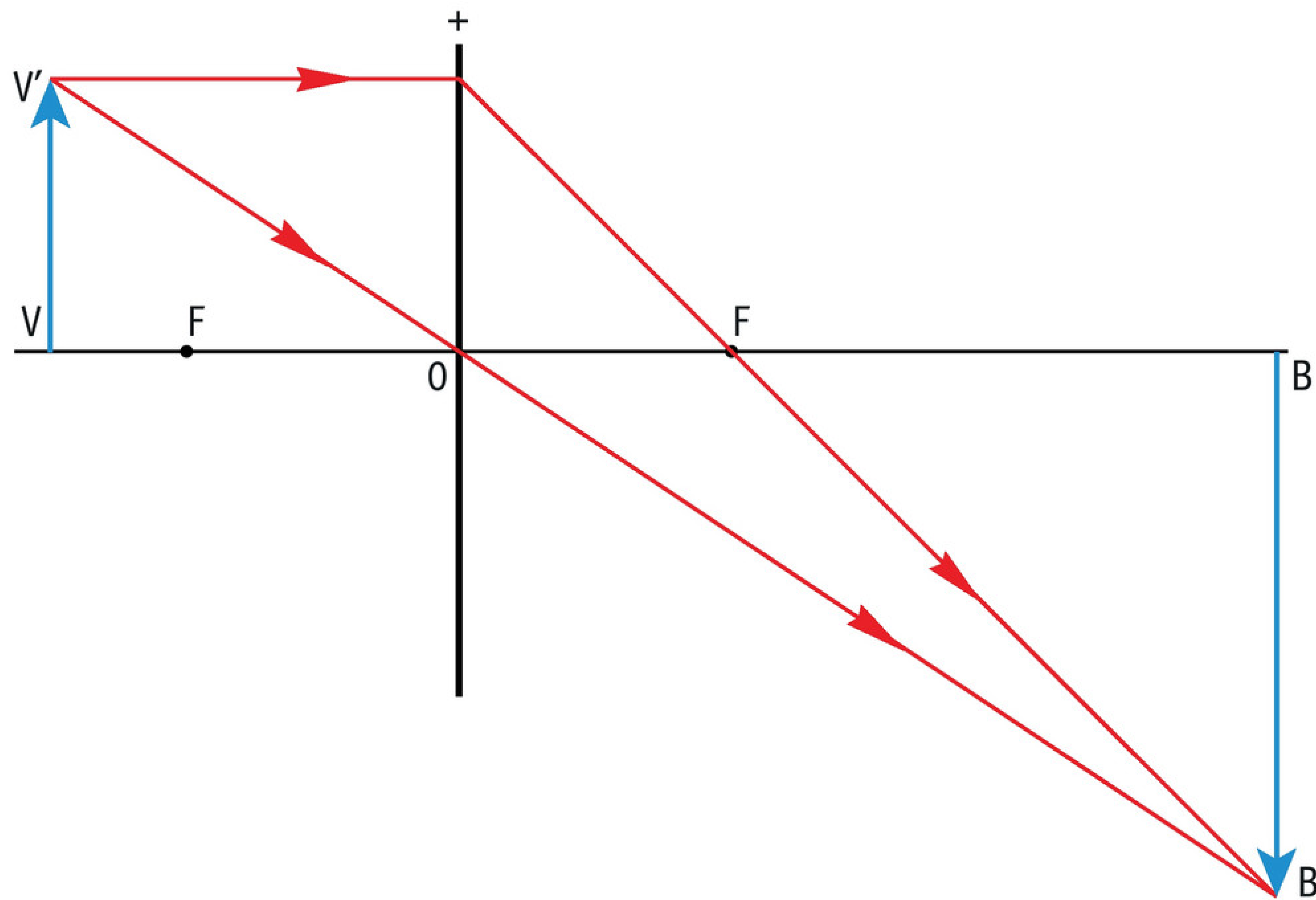
Al deze eigenschappen hangen af van de plaats van het voorwerp ten opzichte van de lens. Bekijk de volgende drie situaties:

- Als het voorwerp verder weg staat dan twee keer de brandpuntsafstand ($v > 2f$), is het beeld verkleind, reëel en omgekeerd (figuur 36). Dit komt bijvoorbeeld voor bij een fotocamera.




▲ **figuur 36** De voorwerpsafstand is groter dan twee keer de brandpuntsafstand.

- Als het voorwerp tussen het brandpunt en twee keer de brandpuntsafstand staat ($f < v < 2f$), is het beeld vergroot, reëel en omgekeerd, bijvoorbeeld bij een beamer (figuur 37).
- Als het voorwerp binnen de brandpuntsafstand wordt geplaatst ($v < f$), is het beeld vergroot, virtueel en rechtopstaand (figuur 35). In deze situatie is de lens een loep waarmee je kleine voorwerpen bekijkt.




▲ **figuur 37** De voorwerpsafstand is groter dan de brandpuntsafstand en kleiner dan twee keer de brandpuntsafstand.

**Onthoud!**

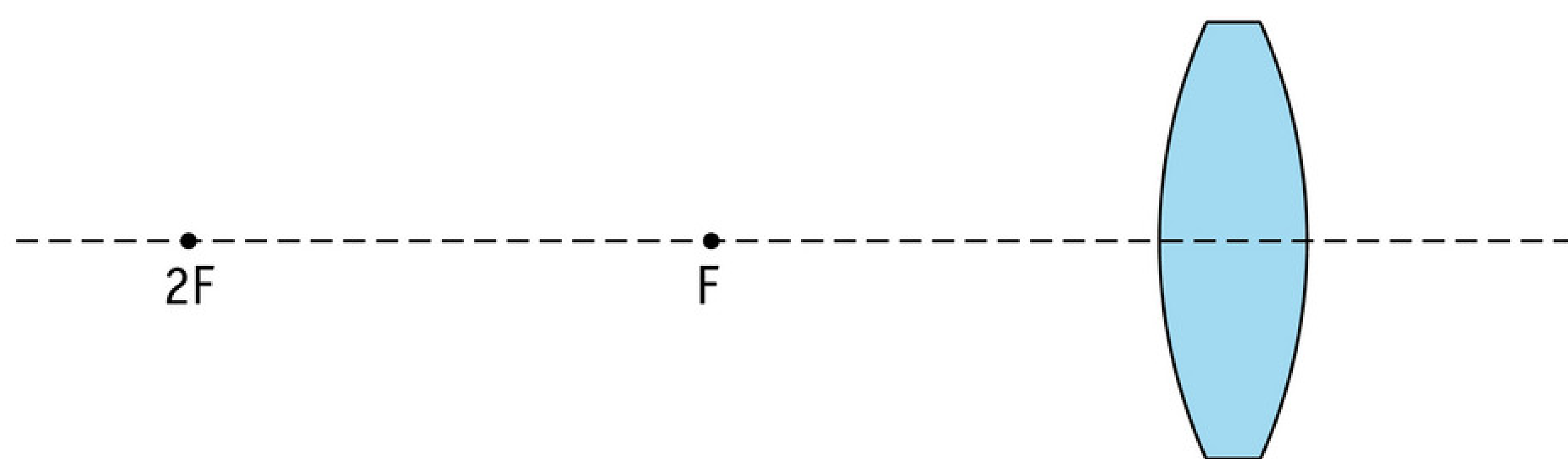
- Evenwijdige lichtstralen schuin op een lens gaan evenwijdig aan de bijas; de bijas gaat door het optisch middelpunt van de lens.
- Evenwijdige lichtstralen schuin op een lens komen in het bijbrandpunt F' samen; het bijbrandpunt ligt recht boven of onder het hoofdbrandpunt.
- Een lichtstraal evenwijdig aan de hoofdas gaat achter de lens door het brandpunt.
- Een lichtstraal door het brandpunt gaat achter de lens evenwijdig aan de hoofdas verder.
- Een lichtstraal door het optisch middelpunt breekt niet en gaat achter de lens verder in de oorspronkelijke richting.

**Opdrachten**

**13** Vakbegrippen bij beeldconstructies
Om een beeld te kunnen construeren, moet je een aantal vakbegrippen kennen.
**a** Leg de begrippen ‘bijbrandpunt’ en ‘bijas’ uit.
**b** Wat zijn ‘de drie constructiestralen’?

**14** Vloeistoflens
Een vloeistoflens maakt een verkleind, reëel beeld op een scherm.
Kies het juiste alternatief.
- Om een vergroot reëel beeld te krijgen, moet de vloeistoflens *boller* / *minder bol* worden.
- Het scherm moet dan *dichter bij* / *verder van* de lens worden geplaatst.

**15** Voorwerpsafstand

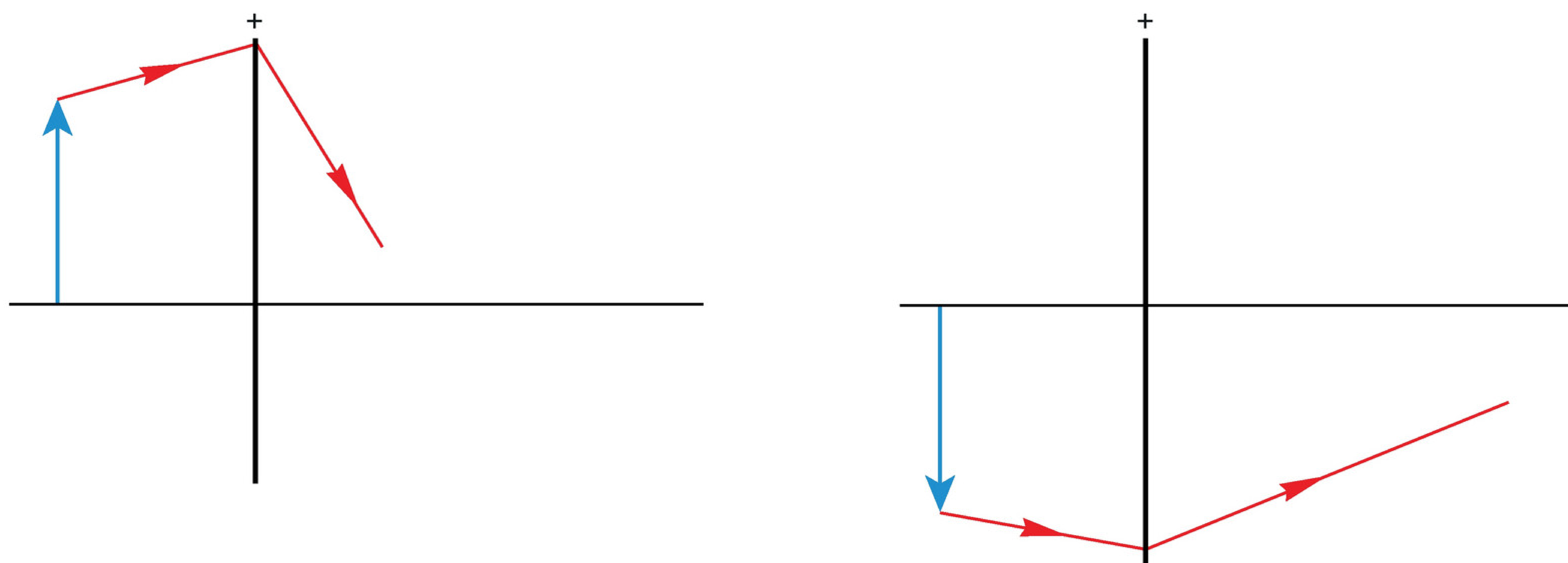



▲ **figuur 38** Waar staat het voorwerp?

Geef in jouw figuur aan waar je een voorwerp neerzet om:

**a** een groter, reëel beeld te krijgen.
**b** een verkleind, reëel beeld te krijgen.
**c** een vergroot, virtueel beeld te krijgen.
**d** een evenwijdige lichtbundel te krijgen.
**e** een even groot reëel beeld te krijgen.

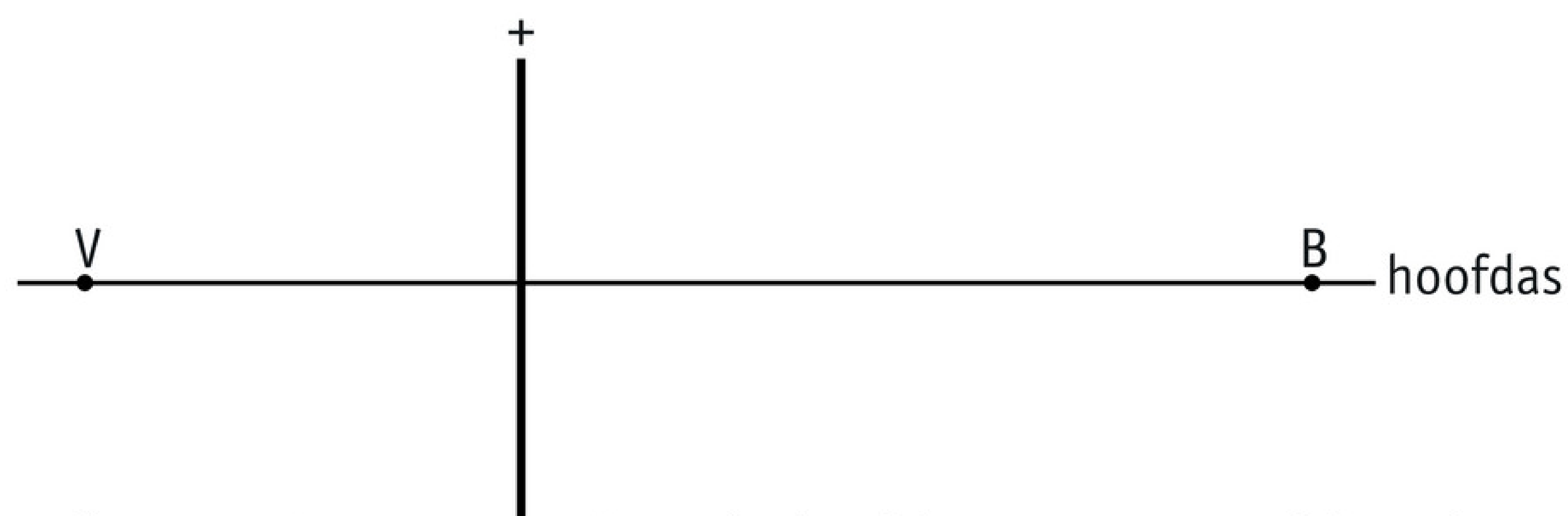
**16** Verschillende lenzen
Een voorwerp wordt voor twee verschillende lenzen geplaatst (figuur 39).




▲ **figuur 39** een voorwerp voor twee verschillende lenzen

Teken in figuur 39 in beide situaties het beeld. Geef ook de plaats van het brandpunt aan.

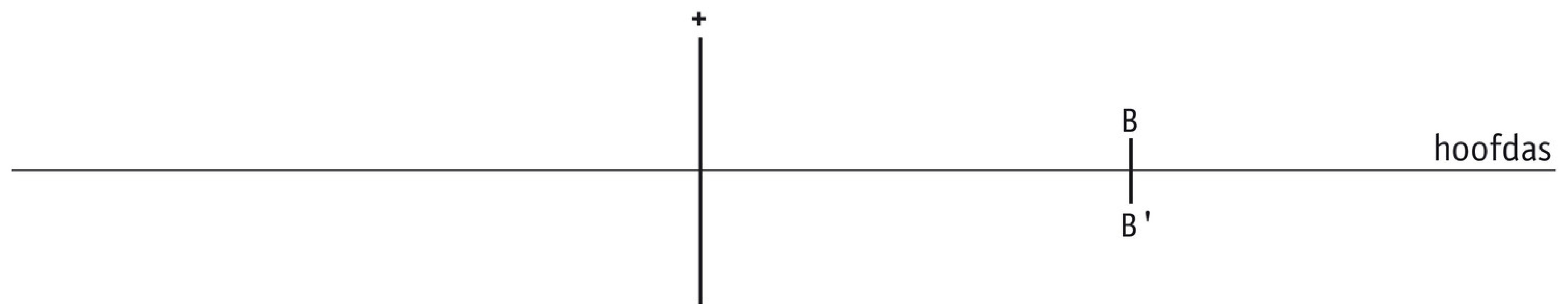
**17** Positieve lens [1]
Een voorwerp V bevindt zich op de hoofdas van een positieve lens (figuur 40).
B is het beeld van voorwerp V.




▲ **figuur 40** voorwerp V op de hoofdas van een positieve lens

Construeer in figuur 40 de beide brandpunten. Teken daartoe eerst een (willekeurige) lichtstraal van punt V naar de lens.

**+18** Positieve lens [2]
De hoofdas van een positieve lens richt je op het midden van de zon. Achter de lens wordt een beeld BB′ gevormd. B′ is het beeldpunt van de bovenkant van de zon.
Construeer in figuur 41 de lichtbundel die convergeert in punt B′.




▲ **figuur 41** beeld van de zon

*naar: examen vwo 2009-I*

# 4 Lenzenformule en lineaire vergroting

In deze paragraaf leer je:
- de lenzenformule toepassen;
- berekeningen maken met de formule voor de vergroting.

De eigenschappen van een beeld hangen af van de plaats van het voorwerp ten opzichte van de lens. Als je een voorwerp verder van een lens plaatst, komt het beeld dichter bij de lens. Andersom geldt dat een voorwerp dichter bij de lens betekent dat het beeld verder van de lens ligt. De relatie tussen de voorwerpsafstand en de beeldafstand heeft te maken met de brandpuntsafstand van de lens.

## Lenzenformule

Met de lenzenformule kun je de exacte plaats berekenen waar je bijvoorbeeld bij een beamer het projectiescherm moet plaatsen. Of over welke afstand je de lens van een spiegelreflexcamera moet verschuiven om een scherp beeld te maken van een voorwerp dat ver weg staat.
De lenzenformule luidt:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

Hierin is:
- $b$ de beeldafstand in meter (m);
- $v$ de voorwerpsafstand in meter (m);
- $f$ de brandpuntsafstand in meter (m).

***Opmerking***
In de lenzenformule mag je ook de afstanden in (bijvoorbeeld) centimeter invullen, als je alle eenheden maar gelijk houdt. De onbekende afstand die je hiermee berekent, heeft dan ook centimeter als eenheid.

**Voorbeeldopgave 8**

Je houdt op 40 cm van een lens een lampje. De brandpuntsafstand van de lens is 10 cm.

**a** Op welke afstand van de lens ontstaat het beeld?

**b** Met dezelfde lens beeld je de zon af op een papiertje. De zon staat op een afstand van 150 miljoen kilometer.
Hoe ver staan lens en papiertje van elkaar?

*Uitwerking*

**a** Je moet de beeldafstand $b$ berekenen.
Gegeven:
$v$ = 40 cm
$f$ = 10 cm
Gebruik de lenzenformule: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$
Invullen geeft:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{40} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{10} - \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{3}{40}\text{, dus } b = \frac{40}{3} = 13 \text{ cm}$$

**b** Je moet de beeldafstand $b$ berekenen.
Gegeven: $v$ = 150 miljoen km. Deze afstand is zeer groot. Je mag dus zeggen ∞ (oneindig).
$f$ = 10 cm
Gebruik de lenzenformule: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$
Invullen geeft:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{10}\text{, dus } b = 10 \text{ cm}$$

In voorbeeldopgave 8b zie je dat als een voorwerpsafstand zeer groot is, de beeldafstand even groot is als de brandpuntsafstand.

## Lineaire vergroting

De plaats van het voorwerp bepaalt behalve de plaats ook de grootte van het beeld. Bij het maken van een foto is de voorwerpsafstand veel groter dan de brandpuntsafstand. Het beeld dat hierbij op de lichtgevoelige chip ontstaat, is kleiner dan het voorwerp zelf. Maar bij een beamer is het beeld veel groter dan het voorwerp. Zo staat het lcd-schermpje van de beamer heel dicht bij het brandpunt van de projectorlens. Hoeveel een beeld groter of kleiner is dan het voorwerp, bereken je met de formule voor de vergroting:

$$N = \frac{BB'}{VV'}$$

Hierin is:

- $N$ de lineaire vergroting (geen eenheid);
- BB′ de grootte van het beeld in meter (m);
- VV′ de grootte van het voorwerp in meter (m).

***Opmerkingen***

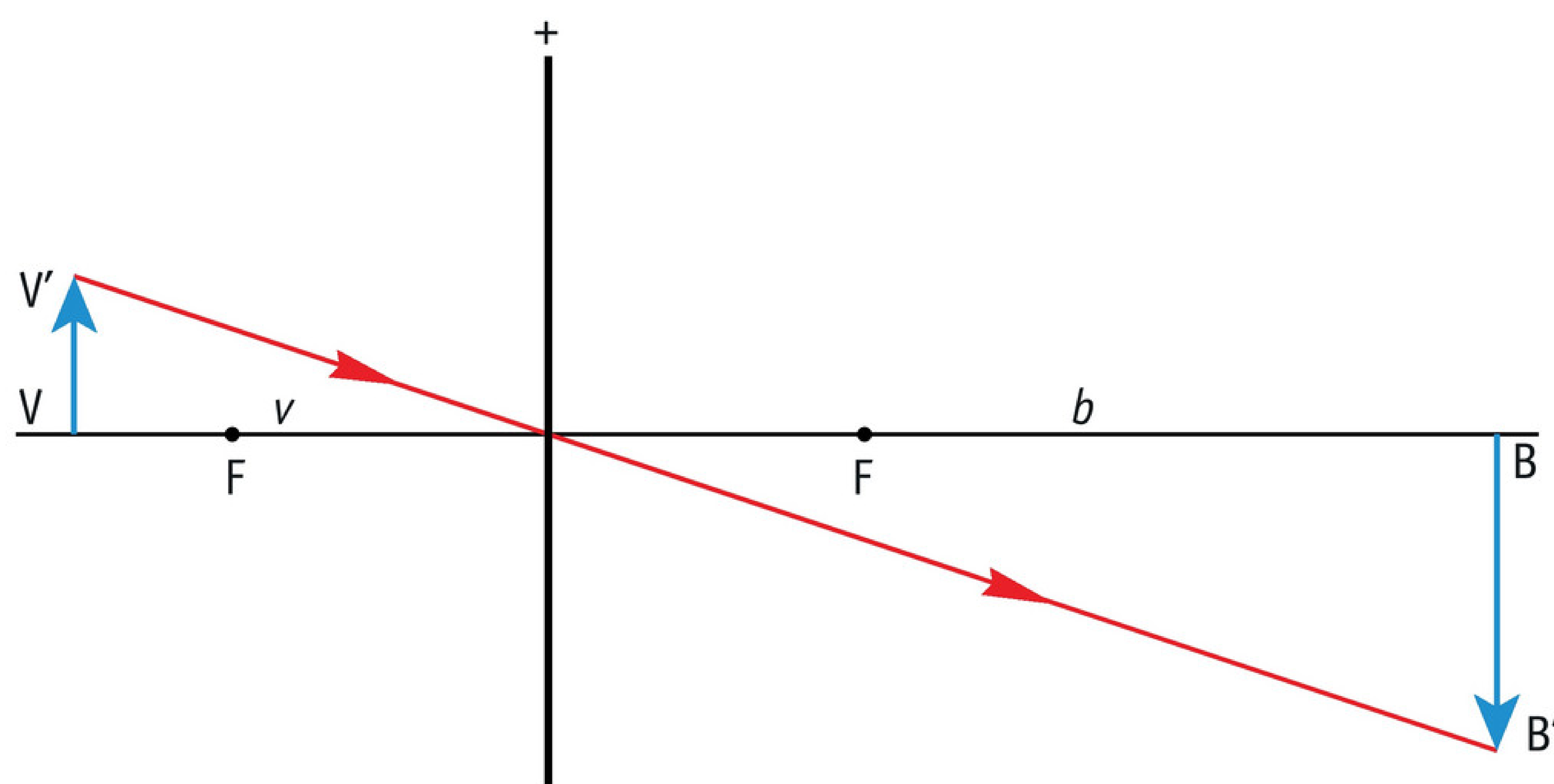
- De term ‘lineair’ betekent ‘in één richting’. In deze formule mag je dus alleen óf de hoogte óf de breedte van een beeld en voorwerp invullen, maar niet de oppervlakte.
- Bij het maken van een foto is het beeld kleiner dan het voorwerp. Ondanks de verkleining spreek je in de natuurkunde over een vergroting. De vergroting heeft dan een waarde tussen 0 en 1. Dat wil zeggen dat bij bijvoorbeeld een vergroting van 0,5 de beeldhoogte 0,5× de voorwerpshoogte is. Het beeld is dus eigenlijk 2× verkleind.

In figuur 42 zie je dat als het beeld groter is dan het voorwerp, de beeldafstand ook groter is dan de voorwerpsafstand. Uit de wiskunde volgt dat de verhouding van BB′ en VV′ gelijk is aan de verhouding van $b$ en $v$. De formule voor de lineaire vergroting kan dan ook worden geschreven als:

$$N = \left|\frac{b}{v}\right|$$

Hierin is:

- $N$ de lineaire vergroting (geen eenheid);
- $b$ de beeldafstand in meter (m);
- $v$ de voorwerpsafstand in meter (m).




▲ **figuur 42** Het beeld is groter dan het voorwerp.

De lineaire vergroting heeft geen eenheid en is altijd positief. Een beeldafstand kan echter ook negatief zijn (bijvoorbeeld bij het virtuele beeld dat een loep maakt). Daarom staan in de formule de absoluutstrepen (de twee verticale lijnen).

▶ **EXPERIMENT 1** Het fietslampje

**Voorbeeldopgave 9**

Een vierkant stuk karton staat op 20 cm afstand voor een lens ($f$ = 15 cm). Het vierkant heeft een oppervlakte van 4,0 cm$^2$.
Bereken de oppervlakte van het beeld.

*Uitwerking*
Gegeven:
$v$ = 20 cm
$f$ = 15 cm
Gebruik de lenzenformule en vul die in:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{v} = \frac{1}{15}$$

$\frac{1}{b} = \frac{1}{60}$, dus $b$ = 60 cm

$$N = \left|\frac{b}{v}\right|$$

$$N = \left|\frac{60}{20}\right|$$

$N$ = 3,0
De oppervlakte van het vierkant is 4,0 $cm^2$. De lengte en breedte van het vierkant is dus 2,0 cm. De lengte en breedte van het beeld is 3,0× groter, dus 6,0 cm × 6,0 cm. De oppervlakte is 6,0 × 6,0 = 36 $cm^2$ (en dus niet 12 $cm^2$).

**Voorbeeldopgave 10**

Een lens ($f$ = 15 cm) vergroot een voorwerp 4,0×.
Bereken de voorwerpsafstand en de beeldafstand.

*Uitwerking*
Gegeven:
$f$ = 15 cm
$N$ = 4,0
Gebruik de lenzenformule en vul die in:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

Elke term vermenigvuldigen met $b$ geeft:

$$\frac{b}{b} + \frac{b}{v} = \frac{b}{f}$$

$$1 + N = \frac{b}{f}$$

$$1 + 4{,}0 = \frac{b}{15}$$

$b$ = 5,0 × 15 = 75 cm

$$N = \left|\frac{b}{v}\right|$$

$4{,}0 = \frac{75}{v}$, dus $v$ = 19 cm

▶ **EXPERIMENT 2** Vergroting

▶ **EXPERIMENT 3** Brandpuntsafstand bepalen

## Onthoud!

- De lenzenformule luidt: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$
- Als een voorwerp ver weg staat ($v = \infty$), geldt: $b = f$
- Lineaire vergroting geeft aan hoeveel keer een beeld groter is dan een voorwerp; de lineaire vergroting bereken je met: $N = \left|\frac{b}{v}\right|$ of $N = \frac{BB'}{VV'}$
- Bij een verkleining is de lineaire vergroting kleiner dan 1, maar groter dan 0.

## Opdrachten

Let op: de gebruikte lenzen in de opdrachten van deze paragraaf zijn allemaal *positieve* lenzen.

**19** Formules voor beeldvorming
Met twee formules kun je berekenen waar een lens een beeld vormt en hoe groot dat beeld is.
**a** Geef de lenzenformule.
**b** Geef de formule voor de vergroting.

**20** Constructietekening
Een lucifer van 3,5 cm hoog staat op 5,0 cm afstand op de hoofdas van een lens. De brandpuntsafstand van de lens is 3,0 cm.
**a** Maak op ware grootte een constructietekening van het beeld.
**b** Bepaal met behulp van jouw tekening de vergroting.

**21** Lenzenformule [1]
Bij een vloeibare lens kun je behalve de voorwerpsafstand $v$ en de beeldafstand $b$ ook de brandpuntsafstand $f$ variëren. Een kaars wordt op een afstand $v$ voor een dergelijke lens geplaatst. Op afstand $b$ van de lens ontstaat dan het beeld met een lineaire vergroting $N$. Bekijk de volgende situaties.
**a** $f$ = 12 cm en $v$ = 18 cm. Bereken $b$ en $N$.
**b** $v$ = 8,0 m en $b$ = 10 cm. Bereken $f$ en $N$.
**c** $N$ = 0,40 en $b$ = 5,0 cm. Bereken $f$ en $v$.
**d** $f$ = 30 cm en $N$ = 4,0. Bereken $b$ en $v$.

**22** Lineaire vergroting [1]
Ahmed maakt een foto van de 31 m hoge Wilhelminatoren in Valkenburg. Het beeld wordt geprojecteerd op een ccd met een hoogte van 24 mm. De brandpuntsafstand van de lens is 28 mm. De toren staat helemaal op de foto.
**a** Bereken de lineaire vergroting van het beeld.
**b** Bereken hoe ver Ahmed van de toren staat.

**23** Lenzenformule [2]
De lens van een beamer beeldt het lcd-schermpje (afmeting 20,8 × 27,7 mm) scherp en volledig af op een projectiescherm (afmeting 250 × 333 cm). Het lcd-schermpje staat 12 cm voor de lens.
**a** Bereken de afstand van de lens tot het projectiescherm.
**b** Bereken de brandpuntsafstand van de lens.
**c** Het projectiescherm wordt 8× zo dichtbij geplaatst. De lens wordt verschoven zodat er weer een scherp beeld wordt gevormd.
Bereken hoeveel de lens verschoven moet worden ten opzichte van het lcd-schermpje.

**24** Lineaire vergroting [2]
De kolibrie is een klein vogeltje dat door een snelle vleugelslag stil kan blijven hangen in de lucht. Een onderzoeker maakte de foto in figuur 43 om de lengte *l* van de vogel te bepalen. Hij gebruikte een telelens met een brandpuntsafstand van 135 mm. De afstand van kolibrie tot lens was 1,80 m. Het beeld werd vastgelegd op een beeldchip. De afmetingen van deze beeldchip zijn 12,8 × 9,6 mm. De getoonde foto die vervolgens ontwikkeld werd, is een volledige weergave van het vastgelegde beeld.




▲ **figuur 43** Een kolibrie zuigt nectar uit een bloem.

Bepaal de lengte *l* van de kolibrie.
*naar: examen 2007-II*

**25** Lineaire vergroting [3]
Alfredo maakt een foto van een bloem. De bloem heeft een diameter van 6,3 cm. De afstand van de lens tot de bloem is 41 cm. De brandpuntsafstand van de lens is 18 mm.
Bereken de diameter van de bloem op de ccd.

**26** Lens verschuiven
Een fotograaf maakt een portret van een meisje. De afstand tussen het meisje en de lens ($f$ = 40 mm) is 150 cm. Het fototoestel staat ingesteld op oneindig. Om een scherpe foto te maken, moet de afstand tussen de lens en de ccd worden veranderd.
Bereken de afstand waarover de lens moet worden verschoven.

**+27** Diameter van de zon
De afstand van de aarde tot de zon is $1{,}50 \cdot 10^{11}$ m. Met behulp van een positieve lens met een brandpuntsafstand van 200 cm wordt een scherp beeld van de zon geprojecteerd op een scherm. De diameter van dit beeld van de zon blijkt 1,8 cm te zijn.
Bereken hieruit de diameter van de zon.

## Eindopdracht

**28** Vuur maken met water

Inge gaat in een zonnig weekend op survival. Helaas vergeet ze haar aansteker. In haar survivalgids staat gelukkig een tip hoe je met eenvoudige middelen een vuurtje kunt maken. De belangrijkste benodigdheid: water!

In figuur 44 zie je hoe je vuur kunt maken met een plastic flesje, gevuld met water.



▲ **figuur 44** vuur maken met een flesje water

**a** Hier staan enkele uitspraken over deze 'waterlens'. Kies steeds het juiste alternatief.
De lichtstralen van de zon worden bij het binnentreden van de fles *naar de normaal toe* / *van de normaal af* gebroken. Bij het verlaten van de fles worden de lichtstralen *naar de normaal toe* / *van de normaal af* gebroken. Hierdoor *convergeert* / *divergeert* de fles de lichtbundel van de zon.

**b** Inge heeft een flesje met een omtrek van 29 cm (waar de fles het breedst is).
Toon aan dat de straal van het flesje gelijk is aan 4,6 cm.

**c** De lichtstralen van de zon vallen evenwijdig in op de fles. Inge gebruikt als brandstof een aantal verdorde bladeren.
Bereken met de lenzenmakersformule op welke afstand van de bladeren Inge de *onderkant* (zie figuur 44) van het flesje moet houden om het vuur zo snel mogelijk te ontsteken. Kies als waarde voor de brekingsindex van water het getal dat is vermeld in Binas voor *geel* licht.

**d** In werkelijkheid is de afstand waarop zij het flesje moet houden anders dan de in opdracht c berekende waarde. De lenzenmakersformule geldt namelijk alleen voor dunne lenzen. Inge krijgt het vuur het snelst ontstoken als ze het midden van de fles op 8,5 cm boven de bladeren houdt.
Bereken de sterkte van Inges waterlens.

Inge kan het flesje ook vullen met zout water. Zout water heeft een grotere brekingsindex dan gewoon water.

**e** Leg uit of de lichtstralen van de zon dan sterker of juist minder sterk door de 'waterlens' worden geconvergeerd.

**Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).**

# 5 Practicum

## EXPERIMENT 1 Het fietslampje (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Onderzoeken hoe een gloeispiraal van een fietslampje in elkaar zit, is niet gemakkelijk. De spiraal zit namelijk onbereikbaar opgeborgen in een glazen bolletje. Daarnaast is het geen pretje om naar een fel gloeiend spiraaltje te kijken.
In dit experiment ga je met een positieve lens de gloeispiraal van een fietslampje projecteren op een stuk papier.

**Onderzoeksvraag**
Hoelang is de gloeispiraal van een gloeilampje?

**Benodigdheden**
voedingskastje; twee kabeltjes; fietslampje; meetlat; meetlint; positieve lens (met bekende brandpuntsafstand); projectiescherm (papier of een gladde muur)

**Uitvoering**
- Sluit het lampje aan op het voedingskastje. Plaats achter het lampje de positieve lens en projecteer het beeld.
- Maak het beeld zo groot en zo scherp mogelijk. Let erop dat de as van de spiraal evenwijdig met het projectiescherm wordt gezet.
- Meet zo nauwkeurig mogelijk de voorwerpsafstand en de beeldafstand.
- Meet zo nauwkeurig mogelijk de lengte van de spiraal op het scherm, het aantal windingen en de gemiddelde afstand tussen de windingen.

**Verwerking**

1 Wat valt je op als je de voorwerpsafstand en de brandpuntsafstand vergelijkt?
2 Bereken de vergroting van het beeld.
3 Bereken hoelang de gloeispiraal is, hoeveel windingen de spiraal heeft en hoe ver twee windingen van elkaar af staan.

**Conclusie**
4 Beantwoord de onderzoeksvraag.

## EXPERIMENT 2 Vergroting (begripspracticum)

**Inleiding**
De lineaire vergroting kun je berekenen als je de voorwerpsafstand en de beeldafstand weet. Maar door de lenzenformule te combineren met de formule voor lineaire vergroting, kun je afleiden dat de vergroting ook te schrijven is als:

$$N = \frac{1}{\frac{v}{f} - 1}$$

In dit experiment ga je onderzoeken wanneer de vergroting maximaal is.

**Onderzoeksvraag**
Welke invloed heeft de grootte van de voorwerpsafstand en brandpuntsafstand op de maximale vergroting?

**Benodigdheden**
positieve lenzen met verschillende brandpuntsafstanden; gloeilampje; voedingskastje; twee kabeltjes; meetlat; projectiescherm (of een gladde muur)

▼ **tabel 1** vergroting van het beeld

| $b$ (cm) | $v$ (cm) | $f$ (cm) | $N$ |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

**Uitvoering**
- Plaats een positieve lens op een bekende afstand van het projectiescherm. Noteer in tabel 1 de beeldafstand en verander deze tijdens het gehele experiment niet!
- Sluit het lampje aan op het voedingskastje. Projecteer een zo groot mogelijk, scherp beeld van de gloeispiraal van het lampje. Noteer in tabel 1 de voorwerpsafstand en de brandpuntsafstand van de lens.
- Voer dezelfde meting uit voor alle andere lenzen.

**Verwerking**

1 Leid de voorgaande formule zelf af.
2 Bereken de vergroting bij elke meting. Vul de tabel helemaal in.

**Conclusie**
3 Beantwoord de onderzoeksvraag.

## EXPERIMENT 3 Brandpuntsafstand bepalen (apparatuurpracticum)

**Inleiding**
De brandpuntsafstand kun je op verschillende manieren bepalen.
In dit experiment ga je op drie verschillende manieren de brandpuntsafstand van een grote dubbelbolle lens bepalen. Deze lens noemen we in dit experiment lens 1.

**Onderzoeksvraag**
Komen de gemeten brandpuntsafstanden bij verschillende manieren van meten overeen?

**Benodigdheden**
lichtkastje; voedingskastje; twee kabeltjes; grote dubbelbolle lens van perspex (lens 1) en een kleine dubbelbolle lens (lens 2); potlood; papier; geodriehoek

**Uitvoering**
***Manier 1***
- Sluit het lichtkastje aan op het voedingskastje.
- Laat een evenwijdige bundel lichtstralen op lens 1 vallen. Kijk waar de lichtstralen elkaar kruisen.
- Noteer de beeldafstand.

**Verwerking**

1 Bepaal de brandpuntsafstand van lens 1.

***Manier 2***
- Stel het lichtkastje zo in dat drie evenwijdige stralen op lens 2 vallen. De lichtstralen komen samen in het brandpunt van lens 2. Het lichtpunt dat hier wordt gevormd, noem je het voorwerpspunt V. Plaats achter lichtpunt V lens 1. Daar waar de lichtstralen achter lens 1 kruisen, noem je het beeldpunt B (figuur 45).
- Meet bij lens 1 de voorwerpsafstand $v$ en de beeldafstand $b$.
- Varieer de voorwerpsafstand en meet telkens de beeldafstand. Noteer in tabel 2 de meetwaarden.

**Verwerking**

2 Vergelijk de voorwerpsafstanden met de bijbehorende beeldafstanden.
Wat kun je hieruit concluderen?

3 Bereken bij elke meting $\frac{1}{v}$ en $\frac{1}{b}$. Vul tabel 2 aan met deze waarden.

4 Maak een $(\frac{1}{v}, \frac{1}{b})$-diagram. Teken door de meetpunten één rechte lijn die de beide assen snijdt.

▼ **tabel 2** voorwerpsafstand en beeldafstand

| $v$ (cm) | $b$ (cm) | $\frac{1}{v}$ (cm$^{-1}$) | $\frac{1}{b}$ (cm$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

5 Lees de punten af waar de lijn de assen snijdt. Vergelijk beide snijpunten. Wat kun je hieruit concluderen?
6 Bepaal de brandpuntsafstand van lens 1.

*Manier 3*

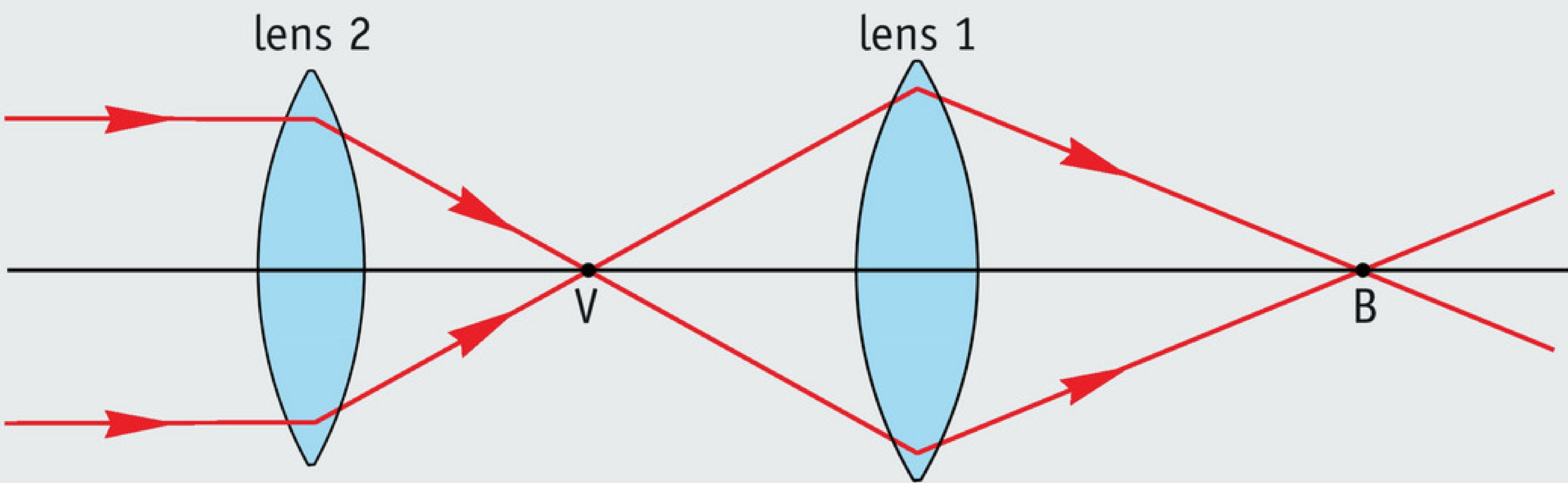
- Teken lens 1 precies over op papier.

**Verwerking**

7 Bepaal van beide gekromde oppervlakken het middelpunt. Meet de kromtestralen.
8 Zoek de brekingsindex van perspex op.
9 Bereken de brandpuntsafstand van lens 1.
10 Vergelijk de brandpuntsafstanden van de drie verschillende manieren met elkaar. Leg uit welke manier het nauwkeurigst is.

**Conclusie**

11 Beantwoord de onderzoeksvraag.




▶ **figuur 45** voorwerpspunt en beeldpunt

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

## EXPERIMENT 4 Uitzetting van een metalen buisje (onderzoekspracticum)

**Inleiding**

Metalen zetten uit bij temperatuursverhoging. De uitzetting is heel klein en niet goed waarneembaar met het blote oog.
In dit experiment ga je met een positieve lens een metalen buisje projecteren op een projectiescherm.

**Onderzoeksvraag**

Hoe groot is de lengteverandering van een metalen buisje bij verwarming?

## EXPERIMENT 5 Virtueel beeld (begripspracticum)

**Inleiding**

Plaats je binnen de brandpuntsafstand van een loep een lampje, dan ontstaat er een virtueel beeld van dit lampje. Dit beeld kun je echter niet projecteren op een scherm. De beeldafstand kun je wel berekenen met de lenzenwet.
In dit experiment ga je na waar het virtuele beeld bij een loep ontstaat.

**Onderzoeksvraag**

Waar ontstaat het beeld bij een loep?

## EXPERIMENT 6 Hoe groot is de zon? (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Het is erg moeilijk om de diameter van de zon rechtstreeks te meten. Het zonlicht is te fel en te gevaarlijk voor onze ogen.
In dit experiment ga je met een positieve lens de zon projecteren op papier.

**Onderzoeksvraag**
Hoe groot is de diameter van de zon?

## ONDERZOEK Een blinkende zilveren ring

**Inleiding**
Het laatste water dat uit de gootsteen loopt en door een putje met ronde gaatjes stroomt, laat vaak een merkwaardig verschijnsel zien (figuur 46). De laatste waterdruppels die in druppelvorm blijven hangen, vormen een bolle lens. Bij het uitzakken van de druppels zie je blinkende zilveren ringen die van grootte veranderen.

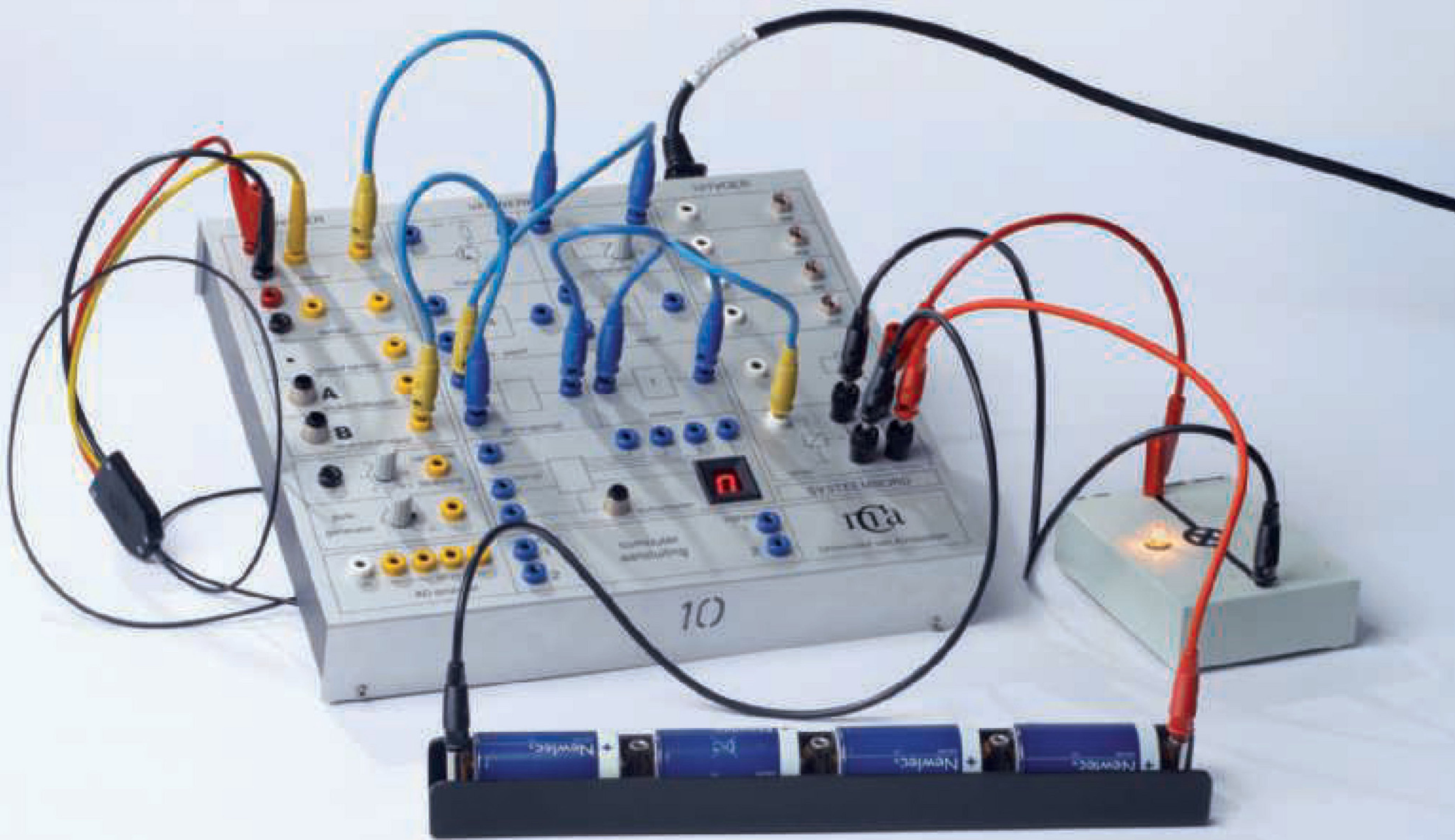


▲ **figuur 46** water in een afvoerputje

**Onderzoeksvragen**
1 Hoe is het ontstaan van een blinkende zilveren ring in een waterdruppel te verklaren?
2 Hoe is te verklaren dat de blinkende zilveren ring kleiner wordt en het donkere gat in het midden groter wordt?

**Praktisch**
Voer een experiment uit dat nodig is om de onderzoeksvragen te beantwoorden, met een afvoerputje met zes of zeven gaatjes. Schets meerdere keren de vorm van de druppel en de grootte van de blinkende zilveren ring.

**Conclusie**
Beantwoord de onderzoeksvragen.



# HOOFDSTUK 7

# Technische automatisering

Zoals de achttiende eeuw de tijd van de industriële revolutie was (stoommachines), zo zijn de twintigste en de eenentwintigste eeuw de tijd van de automatisering. Allerlei machines en processen zijn sinds de Tweede Wereldoorlog geautomatiseerd waardoor handmatige bediening niet of nauwelijks meer nodig is. Daarbij is gebruikgemaakt van twee belangrijke ontwikkelingen: de elektronica en de computer. Dit hoofdstuk is een inleiding in de automatisering, bekeken door een natuurkundige bril. Op veel scholen wordt daarbij het systeembord gebruikt. Daarmee kun je zelf systemen bouwen.

# Wat weet je al over technische automatisering?

Leerdoelen
1 Je kunt de verandering van de weerstand van een NTC bij veranderende temperatuur benoemen.
2 Je kunt de verandering van de weerstand van een LDR bij veranderende lichtsterkte benoemen.
3 Je kunt de drie delen van een automatische schakeling beschrijven.
4 Je kunt de werking van eenvoudige schakelingen met een transistor uitleggen.

In de vorige leerjaren heb je al een aantal dingen over schakelingen geleerd. Je hebt deze kennis weer nodig wanneer je aan dit hoofdstuk begint. Wil je snel controleren wat je nog weet? Maak dan de volgende opdrachten.

## Opdrachten voorkennis

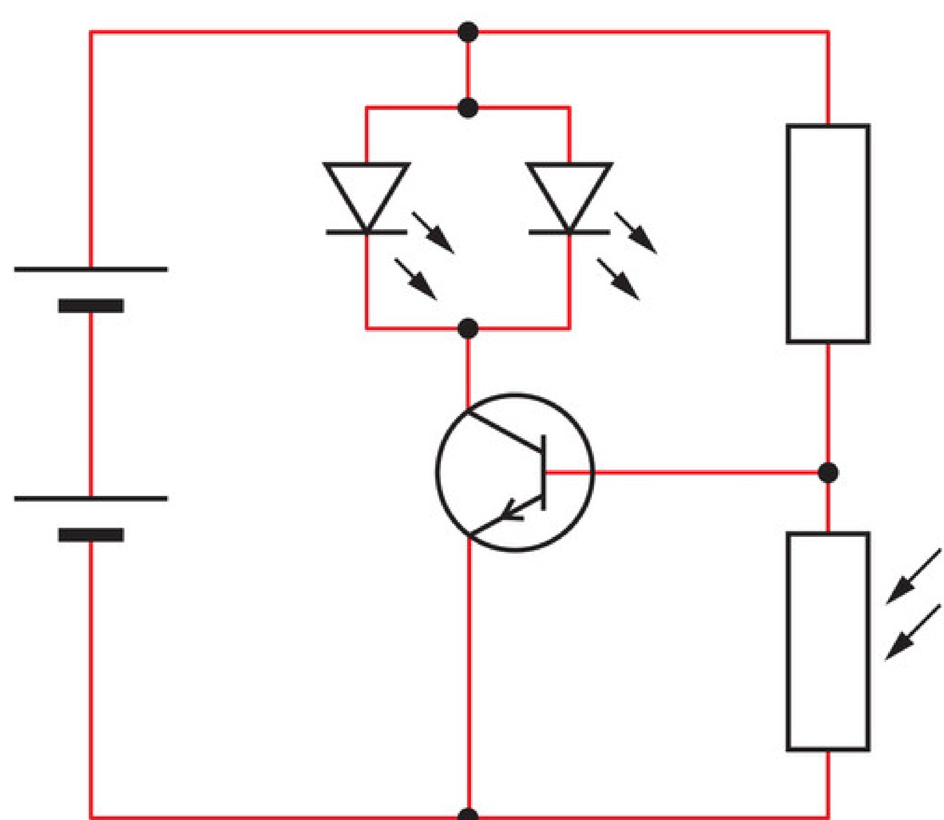
**1** Geef van elke bewering aan of deze waar of onwaar is.
Als de temperatuur van een NTC daalt, wordt zijn weerstand steeds groter.
*waar / onwaar*
Bij een hogere temperatuur gaat de NTC steeds slechter geleiden.
*waar / onwaar*

**2** Kies in de zinnen de juiste woorden.
Hoe zwakker het licht is dat op een LDR valt, des te *groter / kleiner* wordt zijn weerstand.
Als de zon fel schijnt, geleidt de LDR de stroom *beter / slechter*.

**3** De weerstand van een NTC houdt verband met de temperatuur.
Kies het juiste woord.
Als je in een temperatuur-weerstanddiagram (weerstand op de $y$-as en temperatuur op de $x$-as) een grafiek van een NTC tekent, dan is deze grafiek een *dalende / stijgende* lijn.

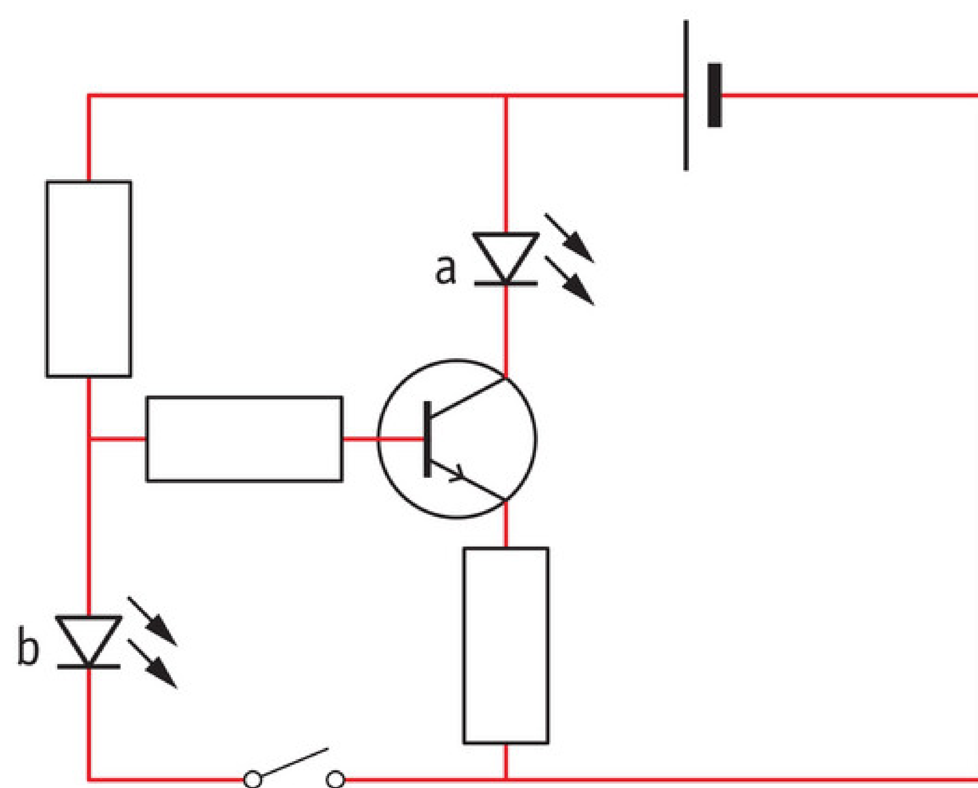
**4** Een automatische schakeling heeft altijd een sensor, schakelaar en actuator.
Wat is de juiste omschrijving van een sensor?
☐ A De sensor doet iets wat op een bepaald moment gewenst is.
☐ B De sensor produceert een elektrisch signaal met informatie over zijn omgeving.
☐ C De sensor schakelt de stroom in of uit.

**5** Bekijk het schakelschema van een automatisch fietsachterlicht in afbeelding 1.
Kies de juiste woorden.
Als ’s avonds de hoeveelheid licht afneemt, wordt de weerstand van de LDR *groter / kleiner*. Als gevolg daarvan loopt er *meer / minder* stroom door de basis van de transistor. De transistor komt hierdoor in de *AAN-stand / UIT-stand* te staan.
Zo worden de leds *ingeschakeld / uitgeschakeld*.



▲ **afbeelding 1**

**6** Bekijk afbeelding 2.
Welke led in de schakeling brandt als de schakelaar is geopend: led a, led b of beide (niet)?
☐ led a
☐ led b
☐ led a en b
☐ geen van beide leds




▲ **afbeelding 2**

 Wil je weten of je voldoende voorkennis hebt voor dit hoofdstuk, maak dan online de *Voorkennistoets*.

Praktijk

# Automatisering in de gezondheidszorg

In ziekenhuizen kom je veel techniek tegen. Vaak hebben medische apparaten te maken met automatisering. Waar vroeger een verpleegkundige of dokter veel tijd kwijt was met het onderzoeken, behandelen en in de gaten houden van patiënten, doen nu machines vaak dit werk.



## Hartbewaking

Elk ziekenhuis heeft een afdeling intensive care. Daar liggen patiënten van wie de gezondheidstoestand zo zorgwekkend is dat ze voortdurend 'bewaakt' moeten worden. Je vindt er bijvoorbeeld mensen die net een zware operatie hebben ondergaan. Vaak worden de patiënten op de intensive care verbonden met een apparaat voor hartbewaking (figuur 1). Het meest opvallende van dit apparaat is de monitor waarop het kloppen van het hart te volgen is. Het hartritme van de patiënt wordt gemeten met behulp van elektroden op de borst. Deze meten de, zeer kleine, elektrische signalen die het hart activeren. Het beeld op de monitor wordt een elektrocardiogram (ecg) genoemd.

Een ecg wordt omgezet in een digitaal signaal dat door een computer wordt verwerkt (figuur 2). De computer is geprogrammeerd om op een aantal belangrijke onderdelen van het ecg-signaal te letten en 'herkent' afwijkingen die duiden op een hartafwijking of een ziekte. In dat geval kan de computer een alarm laten klinken of een defibrillator in werking stellen. Een defibrillator is een apparaat dat een hoeveelheid elektrische energie, een 'stroomstoot', kan geven waardoor het hart weer normaal gaat kloppen.

## Couveuse

Hartbewaking is ook zeer belangrijk voor te vroeg geboren of ziek geboren baby's. Zij worden direct na de geboorte in een couveuse gelegd (figuur 3). Deze kinderen kunnen nog niet zelf hun lichaamstemperatuur op een bepaald niveau houden. Daarom worden in de couveuse de temperatuur, maar ook de luchtvochtigheid en



▲ **figuur 1** bed op de afdeling intensive care met apparatuur voor hartbewaking

▼ **figuur 2** elektrocardiogram van een gezond hart



De computer 'herkent' afwijkingen die duiden op een hartafwijking of een ziekte.



▶ **figuur 3** een baby in een couveuse

het zuurstofgehalte nauwkeurig geregeld. Het toedienen van zuurstof is erg belangrijk, omdat de belangrijkste doodsoorzaak bij vroeggeborenen een probleem met de ademhaling is.
In de couveuse wordt een aantal zaken voortdurend gemeten: de ademhaling, de hartfunctie, de opname van zuurstof door het lichaam en de hersenactiviteit. De couveuse beschermt de baby tegen koude, infecties, geluiden en tocht. Via afsluitbare openingen in de zijwanden kunnen alle noodzakelijke handelingen worden verricht zonder dat de baby uit de couveuse hoeft te worden gehaald.

## Diabetespatiënten

Bij baby's in een couveuse wordt ook de glucose in het bloed in de gaten gehouden. Glucose is een belangrijke 'brandstof'. Deze stof wordt in de cellen verbrand en levert de energie die het lichaam nodig heeft. Het glucosegehalte van het bloed, de bloedsuikerspiegel, wordt geregeld door hormoonklieren. Hierin wordt onder andere het hormoon insuline geproduceerd. Deze hormonen zorgen ervoor dat het glucosegehalte van het bloed altijd rond de 0,1% is.
Als bij de vertering van voedsel veel glucose in het bloed wordt opgenomen, kan het glucosegehalte hoger worden dan 0,1%. De hormoonklieren reageren daarop door veel insuline te produceren. Onder invloed van insuline nemen lever en spieren glucose uit het bloed op en zetten dit om in een andere stof. Als de hormoonklieren te weinig insuline produceren, stijgt het glucosegehalte van het bloed. Indien dit boven 0,16% komt, komt er glucose in de urine. In dat geval is er sprake van suikerziekte ofwel diabetes.
Vijftig jaar geleden moesten diabetespatiënten regelmatig naar het ziekenhuis om het glucosegehalte te laten meten en een injectie met insuline te krijgen. Met behulp van een glucosemeter kan een patiënt tegenwoordig zelf de bloedsuikerspiegel meten (figuur 4). Met een zogenoemde insulinepen kan de patiënt bij zichzelf insuline inspuiten. Helaas is diabetes nog altijd niet te genezen, maar dankzij deze ontwikkeling van steeds betere en kleinere medische apparaten hoeven diabetespatiënten veel minder vaak naar het ziekenhuis dan vroeger het geval was.

▼ **figuur 4** Een diabetespatiënt meet het glucosegehalte van zijn bloed.




### Medtronic, grootste in medische technologie

Het van oorsprong Amerikaanse bedrijf Medtronic werd in 1949 opgericht door Earl Bakken en Palmer Hermundslie. Vanuit hun garage repareerden zij defecte medische apparatuur. Daarnaast verkochten ze apparaten van andere bedrijven en ontwikkelden later zelf medische toestellen. Inmiddels is Medtronic het grootste bedrijf dat in medische technologie is gespecialiseerd is. Het hoofdkantoor van Medtronic Europe is gevestigd in Heerlen.

In 2013 werd het Paradigm® Veo™-systeem van Medtronic door Time Magazine uitgeroepen als een van de beste 25 uitvindingen van het jaar. Het Paradigm® Veo™-systeem is een insulinepomp waarmee de glucosewaarden zo goed mogelijk in de gaten kunnen worden gehouden. Het systeem wordt ook wel 'de kunstmatige alvleesklier' genoemd. Als belangrijkste voordelen worden de automatische stopfunctie genoemd en het feit dat de pomp aan een zogenaamde CGM (Continuous Glucose Monitoring) gekoppeld kan worden. In combinatie:

- bewaakt en registreert het systeem de glucosewaarden 24 uur per dag;
- kunnen met het systeem bepaalde trends worden vastgesteld, waarna de leefwijze en behandeling kunnen worden aangepast;
- waarschuwt het systeem wanneer glucosewaarden afwijken van streefwaarden.

Het Paradigm® Veo™-systeem is de eerste insulinepomp die is uitgerust met een 'automatische insulinestop'. Dat wil zeggen dat de pomp het toedienen van insuline automatisch stopt wanneer de glucosewaarden dalen tot onder een vooraf ingesteld niveau. Anders dan veel andere pompen bewaakt het systeem de patiënt 24/7. Het systeem werkt op batterijen.
Het systeem kent weinig nadelen. Zo is het niet waterdicht en werkt het uitsluitend op infuussets van Medtronic. Dat laatste kan tot prijsopdrijving leiden.

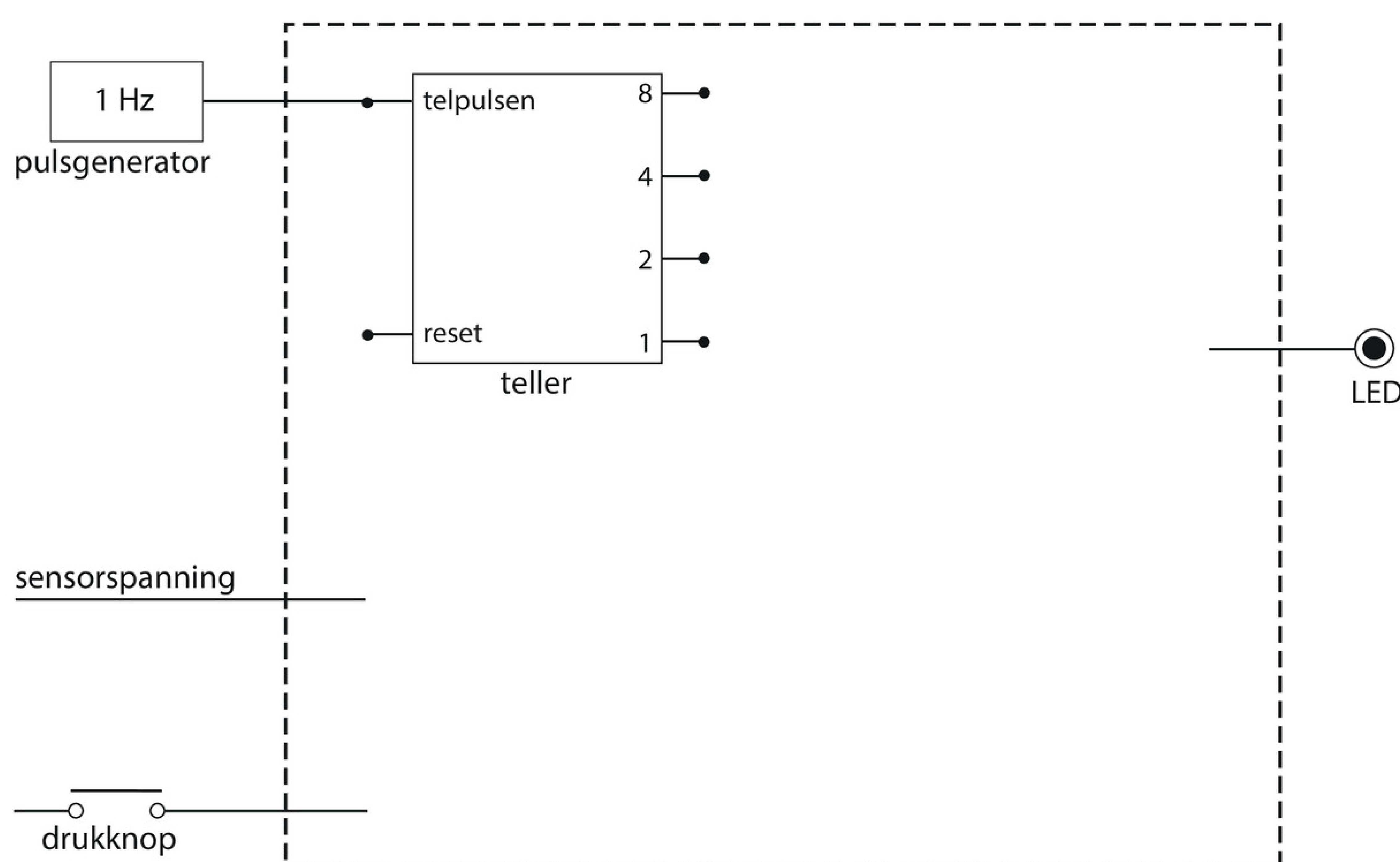
## Opdrachten

Bestudeer eerst de theorie van dit hoofdstuk voordat je de volgende opdrachten uitvoert.

**1** Automatische systemen
Bij automatische schakelingen kun je drie soorten onderscheiden: meetsystemen, stuursystemen (die bijvoorbeeld een alarm aansturen) en regelsystemen.
Geef van de volgende systemen aan tot welke soort ze behoren.
- **a** Een apparaat voor hartbewaking dat een defibrillator in werking stelt.
- **b** Een apparaat waarmee een diabetespatiënt zijn suikerspiegel kan meten.
- **c** Het onderdeel van een couveuse dat zorgt voor een constante temperatuur.

**2** Medtronic
In de kadertekst over Medtronic staat dat met de insulinepomp je glucosewaarden zo goed mogelijk in de gaten kunnen worden gehouden. Eigenlijk klopt deze zin niet: met een onderdeel in de pomp worden de waarden in de gaten gehouden.
- **a** Wat is de algemene benaming voor dit onderdeel?
- **b** Teken het blokschema van een patiënt die een glucosesensor met alarmfunctie gebruikt maar niet de insulinepomp.
- **c** Teken het blokschema voor een patiënt die zijn glucosespiegel regelt met behulp van een glucosesensor en een insulinepomp.

**+3** Veiligheidsmatras
Mees en Wouter lezen in de krant een artikel over een automatisch systeem dat in verpleeghuizen wordt gebruikt. Om te voorkomen dat demente bejaarden 's nachts hun bed verlaten en daarbij vallen, is een veiligheidsmatrasje ontwikkeld. Als de bejaarde rechtop gaat zitten om het bed te verlaten, zorgen druksensoren in de matras ervoor dat er een waarschuwingssignaal afgaat.
- **a** Leg uit dat de druk op de matras groter wordt als de bejaarde rechtop gaat zitten.
- **b** Mees en Wouter bootsen dit systeem na met een systeembord (figuur 5). Als de druk langer dan vier seconden boven een ingestelde waarde uitkomt, gaat een waarschuwingsled branden. Deze moet aan blijven totdat deze door een verzorgende wordt uitgeschakeld. Wanneer een patiënt zich omdraait, kan de druk even (minder dan 4 s) te hoog worden. In dat geval moet het aftellen van de seconden opnieuw beginnen bij een volgende drukverhoging. Teken in figuur 5 de verwerkers en de verbindingen die nodig zijn om het systeem goed te laten werken.




◀ **figuur 5** het waarschuwingssysteem van Mees en Wouter

*naar: examen vwo natuurkunde 1, 2003-II*

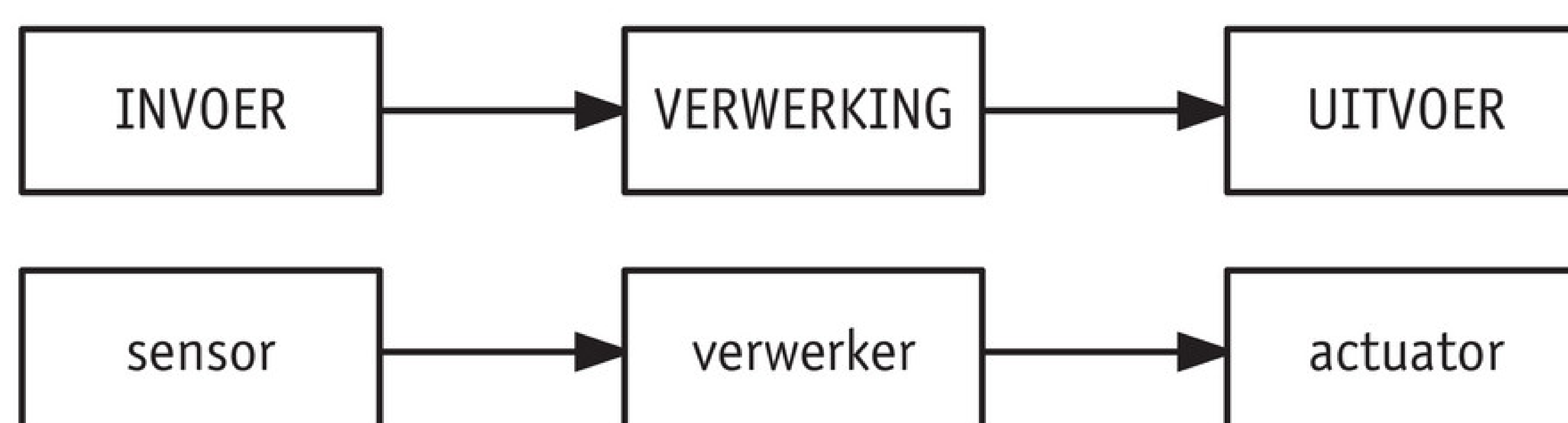
# 1 Systemen

In deze paragraaf leer je:
- dat er drie soorten automatische systemen bestaan en hoe je die herkent;
- blokschema's tekenen van automatische systemen.

Als ontwerpers vanuit een programma van eisen een nieuw, of vernieuwd, apparaat gaan ontwerpen, zullen zij eerst de functie(s) van het apparaat nader omschrijven. Wat moet het apparaat eigenlijk kunnen? In het begin houden zij zich dus nog niet bezig met de taken die de onderdelen van het apparaat moeten kunnen verrichten. Dat komt later als het systeem achter het apparaat duidelijk is geworden.

## Blokschema

Het is lastig de term 'systeem' goed te omschrijven. Om het praktisch te houden, kun je een systeem weergeven in het blokschema dat erbij hoort. Dat blokschema bestaat altijd uit drie blokken of delen (figuur 1):
- invoer (of input);
- verwerking;
- uitvoer (of output).




▲ **figuur 1** het blokschema van elk systeem

Deze drie blokken zie je terug in het systeembord van figuur 2: het linkerdeel is de invoer, het middelste deel is de verwerking en het rechterdeel is de uitvoer.




▲ **figuur 2** het systeembord

In het invoerdeel wordt met behulp van **sensoren** informatie verzameld: zij meten een of meer grootheden die belangrijk zijn voor het systeem. Over sensoren lees je meer in paragraaf 2.
In het verwerkingsdeel wordt de informatie uit het invoerdeel verwerkt. Dat wil bijvoorbeeld zeggen: de gegevens worden vergeleken, ze worden bewerkt, er worden beslissingen genomen op basis van de gegevens. Over **verwerkers** lees je meer in paragraaf 4.
In het uitvoerdeel worden acties uitgevoerd. Die acties worden merkbaar doordat lampjes gaan branden, getallen verschijnen op een display, een zoemer gaat zoemen of een elektromotor gaat draaien. In dit deel spelen **actuatoren** een belangrijke rol. Over actuatoren lees je ook meer in paragraaf 4.
De drie blokken in het blokschema van figuur 1 zijn met pijlen met elkaar verbonden. Die pijlen geven de stroom van informatie aan. Die informatie zal vaak in de vorm van kleine elektrische spanningen worden doorgegeven; die worden signalen genoemd. Daarover lees je meer in paragraaf 3.

Als voor de werking van een systeem geen menselijke handelingen nodig zijn, dan heet een systeem automatisch. Er bestaan drie soorten automatische systemen:
- meetsystemen;
- stuursystemen;
- regelsystemen.

## Meetsystemen

Een **meetsysteem** is een systeem dat als doel heeft een grootheid te meten en de waarde aan de gebruiker te presenteren. Dat kan bijvoorbeeld via een display. Voorbeelden van meetsystemen zijn digitale thermometers en snelheidsmeters. Het blokschema van een meetsysteem ziet eruit als in figuur 3.




▲ **figuur 3** het blokschema van een meetsysteem

## Stuursystemen

Bij een **stuursysteem** wordt ook een grootheid gemeten en wordt beslist aan de hand van een ingestelde waarde of er al dan niet een actie moet volgen. Of er wel of niet iets gebeurt, hangt af van het signaal van de sensor en van de, door de gebruiker, ingestelde (kritische) waarde. Voorbeelden van stuursystemen zijn een buitenlamp die aangaat als er iemand bij de voordeur is, een rookmelder in huis en het startsysteem van een auto. Het blokschema van een stuursysteem ziet eruit als in figuur 4. Je ziet dat bij een stuursysteem in het verwerkingsdeel de gemeten waarde wordt vergeleken met een gewenste of kritische waarde. Je leest daar meer over in paragraaf 4.

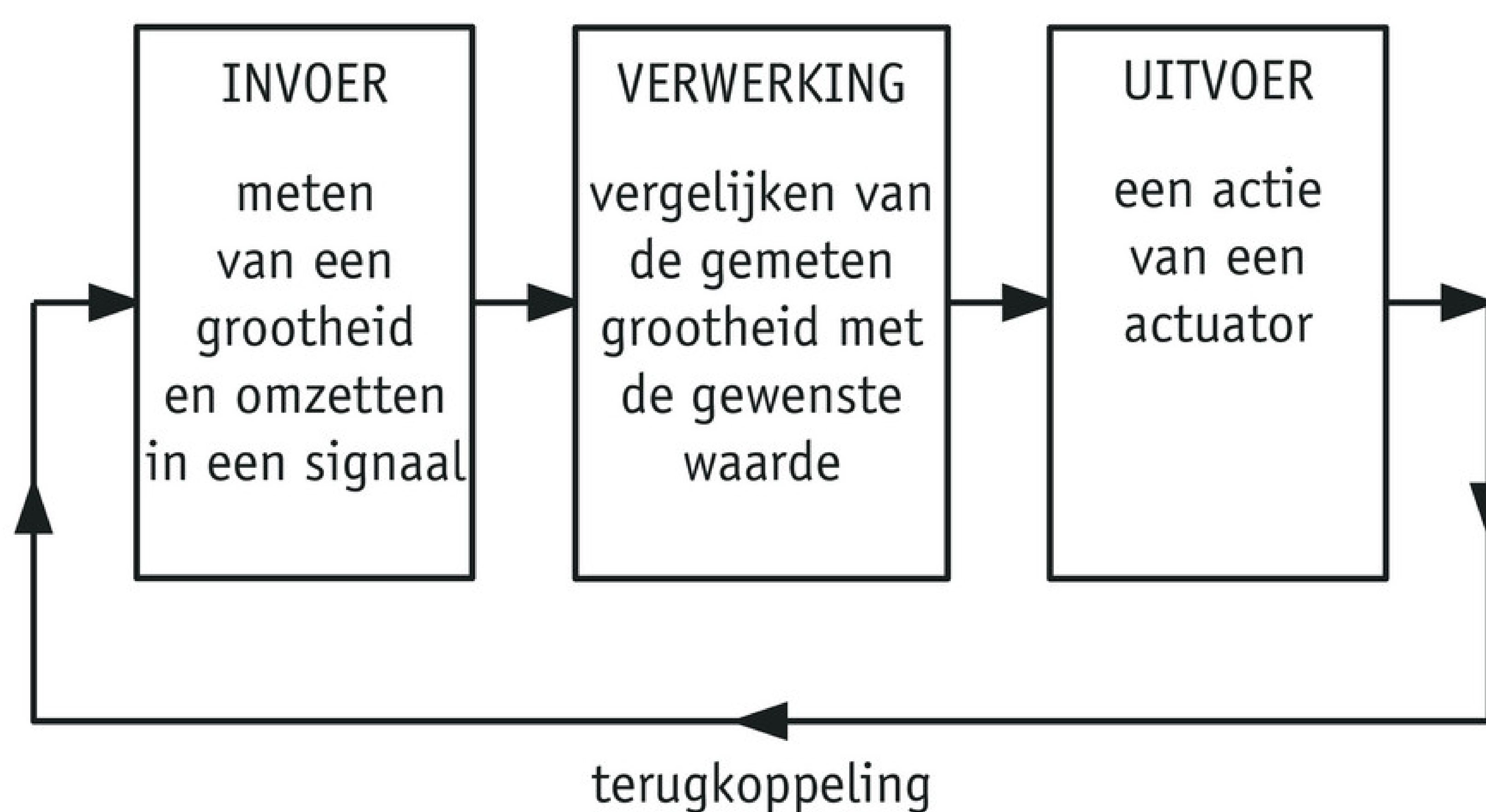



▲ **figuur 4** het blokschema van een stuursysteem

## Regelsystemen

Een **regelsysteem** is een systeem waarbij de verwerking erop is gericht een bepaalde grootheid zo goed mogelijk op een gewenste waarde te houden. Die gewenste waarde is meestal vooraf ingesteld door de gebruiker.
Regelsystemen lijken op stuursystemen. Toch is er een groot verschil: in een regelsysteem is een **terugkoppeling** (feedback) aanwezig. De verwerker vergelijkt voortdurend de gemeten waarde van de grootheid met de gewenste waarde en onderneemt actie op basis van het verschil tussen beide. Een bekend voorbeeld van een regelsysteem is de centrale verwarming in huizen waar een kamerthermostaat wordt gebruikt. Deze thermostaat meet de temperatuur in de kamer en vergelijkt die met de door de bewoners ingestelde temperatuur (de gewenste waarde). Als de werkelijke temperatuur onder de gewenste temperatuur komt, gaat er een signaal naar de verwarmingsketel. In die ketel zit een brander die meestal brandt op aardgas. Het signaal zorgt ervoor dat de gasklep in de ketel wordt geopend waardoor aardgas naar de brander stroomt. Als de temperatuur in de kamer weer op het gewenste niveau is, zal de thermostaat een signaal geven aan de ketel waardoor de gasklep weer wordt gesloten.
In dit voorbeeld is sprake van een aan-/uitregeling. Bij sommige regelsystemen is er een *proportionele* regeling: de actie is evenredig met het verschil tussen de gemeten en de gewenste waarde. In een cv-systeem met proportionele regeling wordt de vlam van de brander groter naarmate het verschil tussen de gemeten en de gewenste temperatuur groter is.

Het blokschema van een regelsysteem is in figuur 5 afgebeeld. Het heeft iets wat de blokschema's van meet- en stuursystemen niet hebben: een lijn/pijl die de terugkoppeling aangeeft. Deze loopt van het uitvoerdeel naar het invoerdeel en geeft aan dat wat er aan de uitvoerkant gebeurt, direct wordt geregistreerd aan de invoerkant.




▲ **figuur 5** het blokschema van een regelsysteem

**Onthoud!**

- Er zijn drie soorten systemen: meetsystemen, stuursystemen en regelsystemen.
- Elk systeem kun je weergeven met een blokschema met drie blokken: invoer, verwerking, uitvoer.
- Tussen de blokken wordt informatie doorgegeven door middel van signalen.
- Bij een regelsysteem is er terugkoppeling; dit zie je aan de lijn die vanuit de uitvoer naar de invoer loopt.
- Een meetsysteem geeft een meetwaarde weer, een stuursysteem zorgt ervoor dat er onder een bepaalde voorwaarde iets gebeurt (voorbeeld: alarm gaat af) en een regelsysteem zorgt ervoor dat een grootheid op een bepaalde waarde blijft (voorbeeld: de temperatuur in huis).

## Opdrachten

**1** Blokschema

Je kunt een systeem weergeven met een blokschema.

**a** Hoe heten de drie delen van het blokschema van elk systeem?
**b** In welk deel van het blokschema bevinden zich actuatoren?
**c** In welk deel bevinden zich sensoren?
**d** Leg kort uit wat er in elk deel van het blokschema gebeurt.

**2** Automatische systemen

In de volgende situaties spelen apparaten een rol.
Geef bij elke situatie aan om welk soort systeem het gaat: een meet-, een stuur- of een regelsysteem.

**a** Een oven die op een bepaalde temperatuur blijft.
**b** Een magnetron waarop je de opwarmingstijd kunt instellen.
**c** Een vaatwasser die met een pieptoon aangeeft dat hij klaar is met het wasprogramma.
**d** Een display langs de weg dat van elke auto die langsrijdt de snelheid aangeeft.
**e** Op het display van een glucosemeter kan een patiënt de bloedsuikerspiegel aflezen.
**f** Om 9.00 uur gaat de schoolbel.
**g** Met cruisecontrol blijft een auto op een constante snelheid rijden.
**h** De ruitenwissers van een auto gaan automatisch aan als de voorruit nat wordt.

**3** Inbraakalarm

Een inbraakalarm bestaat uit een centrale schakelkast waarop een glasbraakmelder (reageert op trillingen van glas), een telefoonverbinding, een bewegingssensor, een deurcontact, een zwaailicht en een sirene zijn aangesloten.

**a** Geef van al deze onderdelen aan of ze tot de invoer, de verwerking of de uitvoer van dit systeem behoren.
**b** Teken het bijbehorende blokschema.

**4** Aquarium

In een tropisch aquarium moet de temperatuur altijd op ongeveer 23 °C worden gehouden. Het aquarium wordt verwarmd met een elektrisch verwarmingselement.

**a** Teken het bijbehorende blokschema. Noteer in elk blok wat er gebeurt.
**b** Leg uit wat er zou gebeuren als dit systeem geen terugkoppeling zou hebben.
**c** Leg uit wat het betekent voor het verwarmingselement als de regeling van de watertemperatuur proportioneel zou zijn.

**5** Model

Sjors-Peter wil een model maken voor het opwarmen van de lucht in een kamer door een verwarming (de opwarming van de muren wordt verwaarloosd). In figuur 6 zie je het model dat Sjors-Peter heeft gemaakt. De temperatuur in de kamer wordt geregeld door een automatisch systeem, waarbij een radiator de kamer verwarmt. Er verdwijnt ook warmte uit de kamer naar de omgeving (modelregel 4).

| modelregels | startwaarden en constanten |
|---|---|
| 1 t = t + dt | 1 t = 0 |
| 2 als Tbinnen < Tingesteld dan dQin = P*dt | 2 dt = 0,1 |
| 3 anders ... ... ... eindals | 3 Tbuiten = 5 |
| 4 dQuit = k*(Tbinnen–Tbuiten)*dt | 4 Tbinnen = 15 |
| 5 dQ = dQin – dQuit | 5 Tingesteld = 22 |
| 6 dTbinnen = dQ/ (c*m) | 6 c = ... |
| 7 Tbinnen = Tbinnen + dTbinnen | 7 m = 130 |
| | 8 P = 2000 |
| | 9 k = 75 |

▲ **figuur 6** het model van Sjors-Peter

Modelregel 6 is afgeleid uit een formule die in Binas tabel 35 staat.

**a** Geef deze formule.

**b** Leg uit of dit model een stuursysteem of een regelsysteem beschrijft.

De temperatuur in de kamer wordt op een vooraf ingestelde waarde gehouden, door de radiator in te schakelen als het te koud is, en deze uit te schakelen als het te warm wordt (modelregel 2 en 3).
Sjors-Peter gaat er in zijn model van uit dat de radiator geen warmte meer afgeeft zodra die wordt uitgeschakeld.

**c** Leg uit dat dit in werkelijkheid niet zo is.

**d** Vul (uitgaande van Sjors-Peters aanname) modelregel 3 verder aan.

**e** Geef de waarde voor de constante $c$.

**f** Voer het model uit.
Na hoeveel seconden is de ingestelde temperatuur bereikt?

**g** De temperatuur in een verwarmde huiskamer schommelt altijd rond de ingestelde waarde. Dit kun je in het model ook zien als je de waarde van d$t$ veel groter maakt. Verander de waarde van d$t$ van 0,1 naar 50 en voer het model uit. Ga na tussen welke waarden de temperatuur van de kamer schommelt.

# 2 Sensoren

In deze paragraaf leer je:

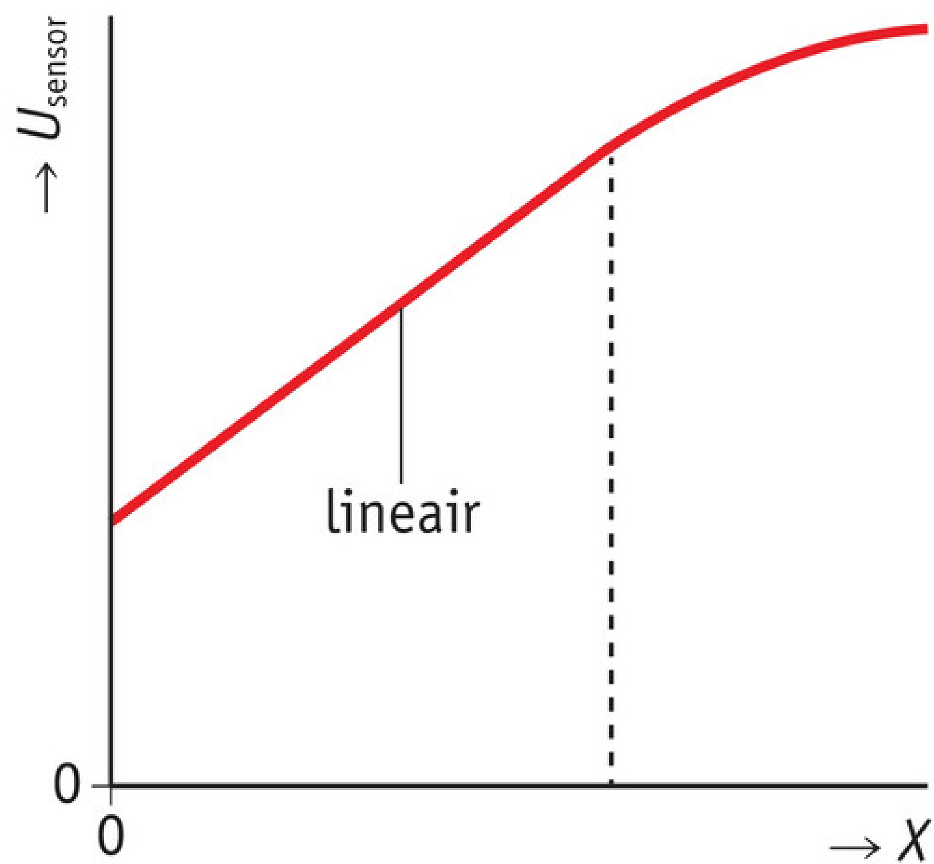
- hoe je de gevoeligheid en het bereik van een sensor uit een ijkdiagram bepaalt;
- een aantal verschillende sensoren kennen.

Een systeem moet informatie krijgen uit zijn omgeving. Zoals een mens zintuigen heeft, zo heeft een apparaat sensoren. Op basis van de informatie die de sensoren doorgeven, kan het systeem zijn werk doen.

▶ **EXPERIMENT 1** De temperatuursensor

## IJkdiagram

Een sensor zet een grootheid *X*, bijvoorbeeld temperatuur of lichtsterkte om in een elektrische spanning. De grootte van die spanning is een maat voor de grootte van *X*. Voor elke sensor kan een **ijkdiagram** worden gemaakt. Daarin staat de grootheid *X* langs de *x*-as en de spanning die de sensor geeft langs de *y*-as (figuur 7). Merk op dat de grafiek in het ijkdiagram niet per se door de oorsprong hoeft te gaan en dat de lijn zeker niet altijd een rechte lijn is. Waar de grafiek wel recht is, noemen we het verband tussen *X* en de sensorspanning **lineair** (figuur 7).




▲ **figuur 7** Het ijkdiagram van een sensor ziet er in het algemeen zo uit.

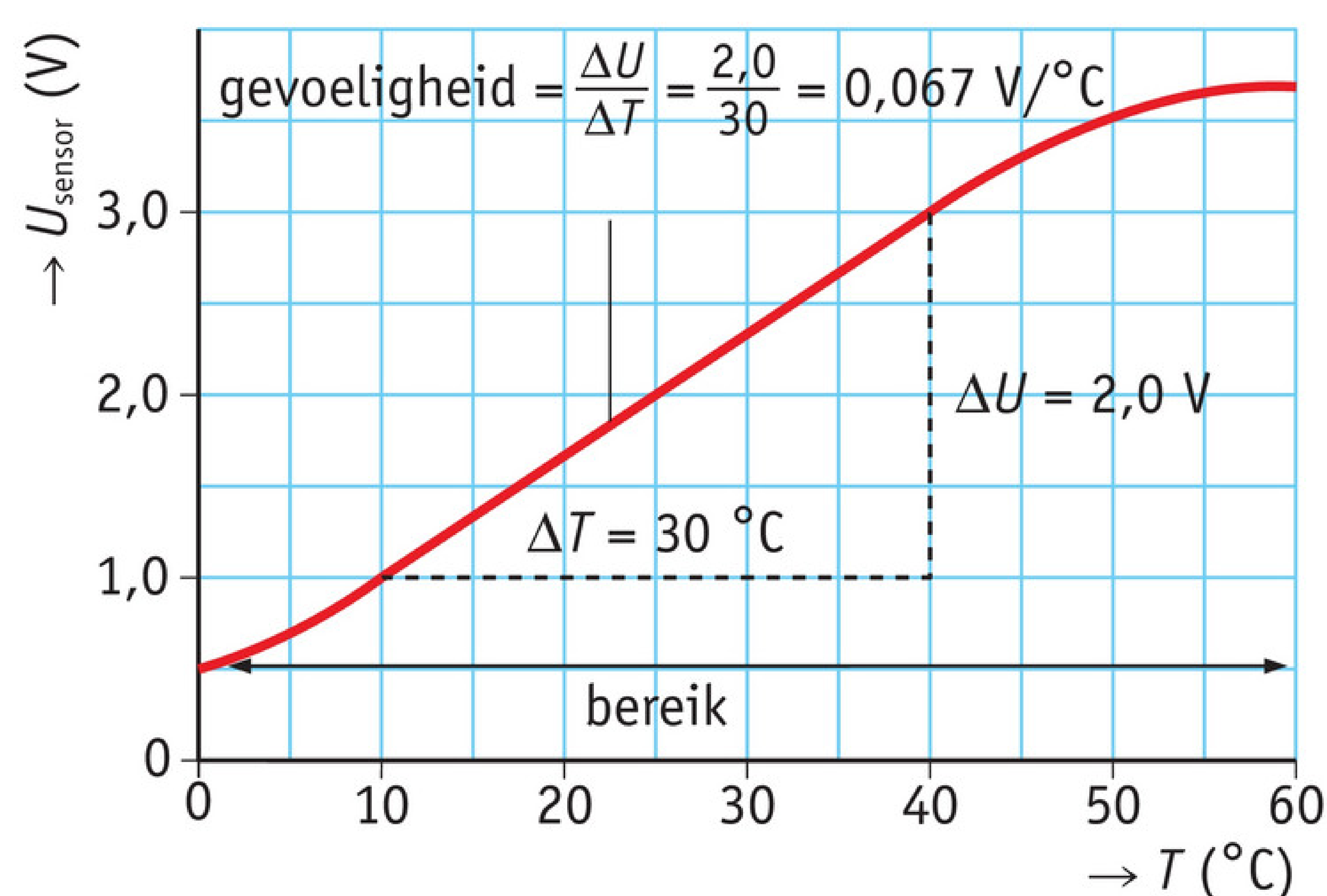
## Gevoeligheid en bereik

Als de ijkgrafiek van een sensor een rechte lijn is, kun je de **gevoeligheid** van die sensor bepalen. De gevoeligheid geeft aan hoe goed de sensor reageert op een verandering in de grootheid die hij meet. Dus bijvoorbeeld: hoeveel millivolt komt er meer uit de sensor als de temperatuur één graad stijgt? Als dat weinig millivolt is, dan is de sensor niet erg gevoelig. De gevoeligheid is dus de toename (of afname) van de spanning als de ingangsgrootheid één eenheid stijgt.
In figuur 8 zie je hoe je de gevoeligheid bepaalt. In feite bepaal je dan de steilheid of het hellingsgetal van de grafiek. Neem een zo groot mogelijk deel van het rechte deel van de grafiek. Lees af hoe groot $\Delta y$ en $\Delta x$ zijn en deel die door elkaar:

$$\text{gevoeligheid} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Achter het getal dat je dan krijgt, moet nog wel een eenheid. Dat is voor een temperatuursensor bijvoorbeeld de eenheid volt per graad Celsius (V/°C of V °C$^{-1}$).

Uit figuur 8 kun je ook bepalen hoe groot het **bereik** (of meetbereik) van de sensor is. De grafiek loopt van 0 °C tot 60 °C, dus tussen die twee temperaturen kan de sensor in elk geval een spanning doorgeven. Als je alleen naar het lineaire deel van de grafiek kijkt, dus waar de lijn recht loopt, dan is het bereik 10 °C tot 40 °C.




▲ **figuur 8** gevoeligheid en bereik van een temperatuursensor bepalen

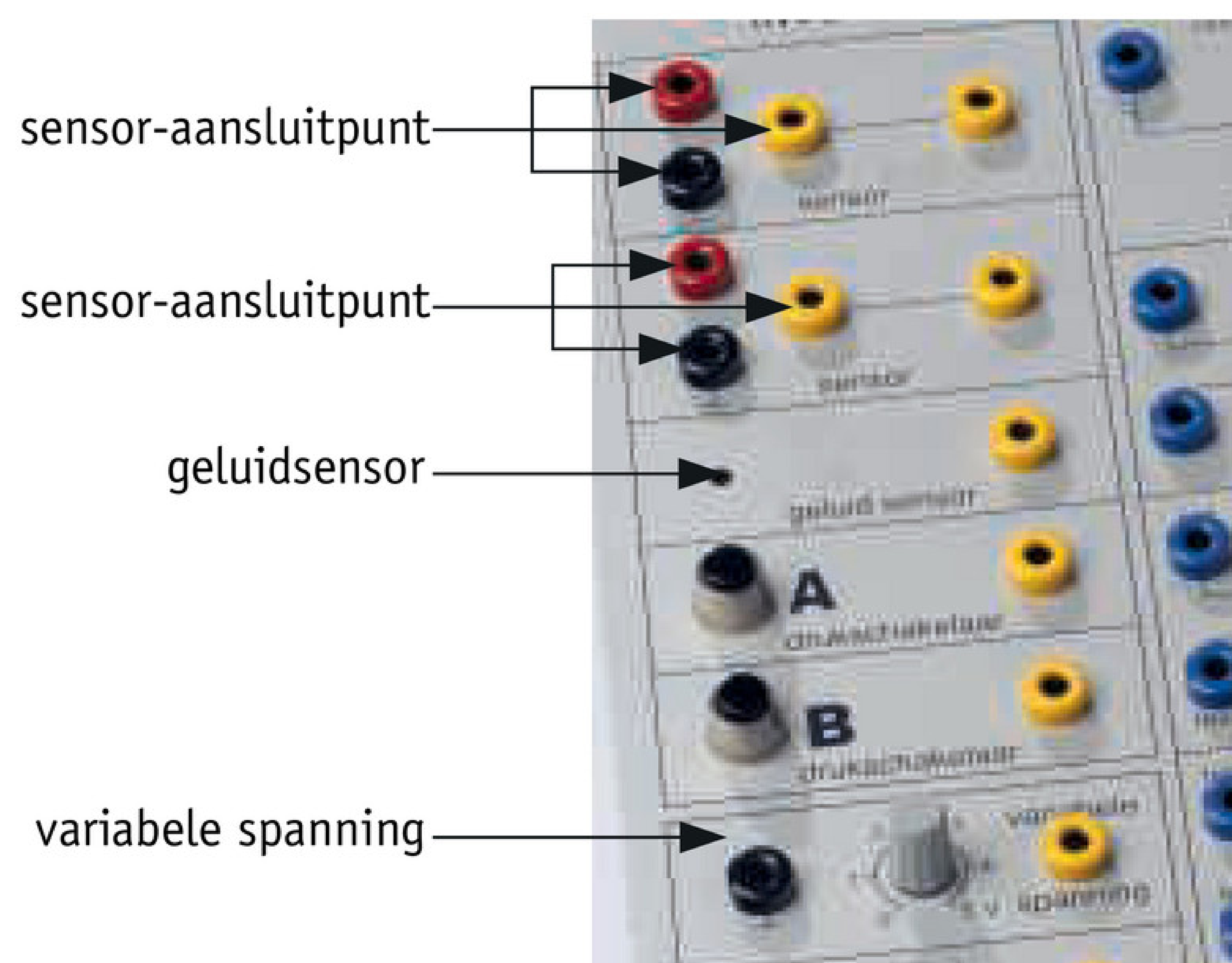
## Soorten sensoren

Voor vrijwel elke grootheid bestaat wel een sensor. De bekendste zijn:

- de lichtsensor;
- de temperatuursensor;
- de geluidsensor;
- de druksensor.

Met een lichtsensor kun je de lichtsterkte bepalen in de buurt van de sensor. De eenheid van lichtsterkte is de lux, dus in het ijkdiagram staat langs de horizontale as ‘lichtsterkte (lux)’. Een lichtsensor wordt bijvoorbeeld gebruikt om straatlantaarns automatisch te laten aangaan als het donker wordt. Je kunt een lichtsensor maken met een LDR. Een temperatuursensor kun je maken met een NTC. Beide speciale weerstanden zijn behandeld in hoofdstuk 2.

Linksboven op het systeembord kun je twee sensoren aansluiten (figuur 9). Daaronder zit een ingebouwde geluidsensor. Met de ‘variabele spanning’ linksonder in het systeembord kun je elke sensor nabootsen. Door aan de knop te draaien, verander je de spanning die deze spanningsbron afgeeft (de signaalspanning) van 0 tot 5 V.




▲ **figuur 9** sensoraansluitingen en de variabele spanning op het systeembord

**Onthoud!**

- Een sensor zet een grootheid om in een elektrische spanning.
- Het verband tussen de te meten grootheid en de sensorspanning wordt weergegeven in het ijkdiagram van de sensor.
- Uit het ijkdiagram kun je de gevoeligheid en het bereik van de sensor bepalen.

**Opdrachten**

**6** IJkdiagram

Elke sensor heeft een ijkdiagram.

**a** Schets het ijkdiagram van een temperatuursensor waarvan het verband tussen spanning en temperatuur lineair is. Geef aan wat er bij de horizontale as en bij de verticale as staat.

**b** Geef in je schets van opdracht a aan hoe je de gevoeligheid van deze sensor bepaalt.

**c** Kan een temperatuursensor waarvan de ijkgrafiek niet lineair is, wel gevoelig zijn voor verandering van de temperatuur?

**7** Gevoeligheid
Bij de gevoeligheid van een sensor hoort een eenheid.
**a** Welke eenheid hoort bij de gevoeligheid van een lichtsensor?
**b** Hoe zou de sensor heten waarvan mV $N^{-1}$ de eenheid van de gevoeligheid is?

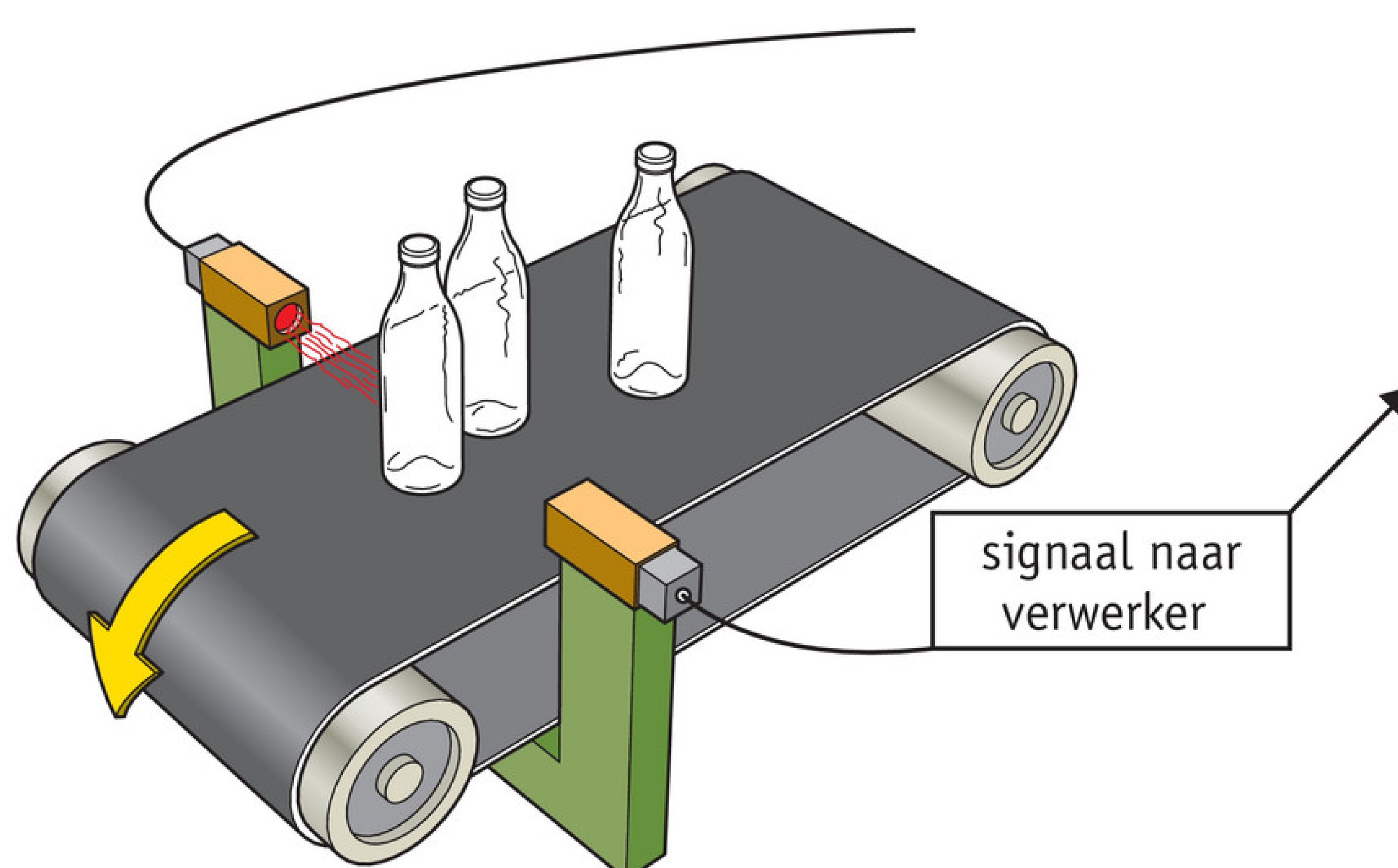
**8** Geluidsensor
Eigenlijk is een geluidsensor een drukmeter. De gemeten druk kan het apparaat omrekenen naar geluidssterkte.
**a** Welke druk meet een geluidsensor?
**b** Leg uit dat een microfoon eigenlijk een geluidsensor is.

**9** Sensoren
In veel apparaten zitten sensoren.
Welk type sensoren zitten in de volgende apparaten? Als je denkt dat ze niet in de tekst zijn genoemd, verzin dan zelf een naam voor de sensor.
**a** een elektronische weegschaal
**b** een thermostaat
**c** een koelkast (noem er twee)
**d** een buitenlamp die aangaat als er 's avonds iemand bij staat (noem er twee)

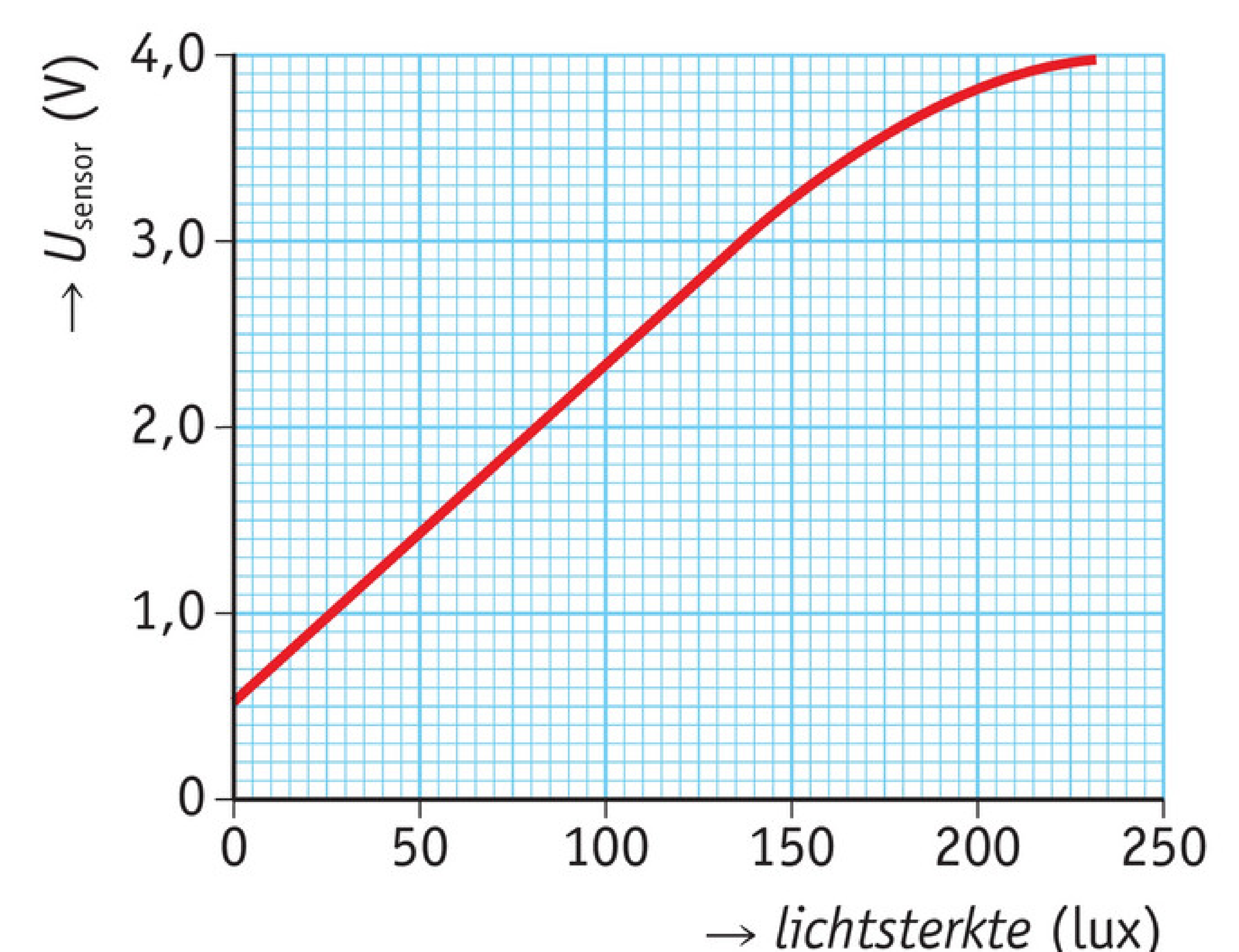
**10** Lichtsensor
Lichtsensoren kunnen worden gebruikt om te onderzoeken of er iets voorbijkomt, bijvoorbeeld op een lopende band. Aan de ene kant van de band staat dan een lamp en aan de andere kant een lichtsensor (figuur 10).
Als er een fles passeert, verandert het signaal dat de sensor afgeeft.
**a** Leg uit hoe dat komt.

In figuur 11 zie je de ijkgrafiek van de gebruikte sensor. Als er niets voorbijkomt op de lopende band, geeft de sensor een spanning van 3,2 V af.
**b** Hoe groot is dan de lichtsterkte bij de sensor?
**c** Bepaal de gevoeligheid van de sensor in het lineaire gebied.
**d** Bepaal het bereik van het lineaire gebied van de sensor.

Soms passeren er twee flessen tegelijkertijd.
**e** Leg uit dat je dat kunt zien aan het signaal dat de sensor geeft.




▲ **figuur 10** Een lichtsensor kun je gebruiken om flessen op een lopende band te tellen.



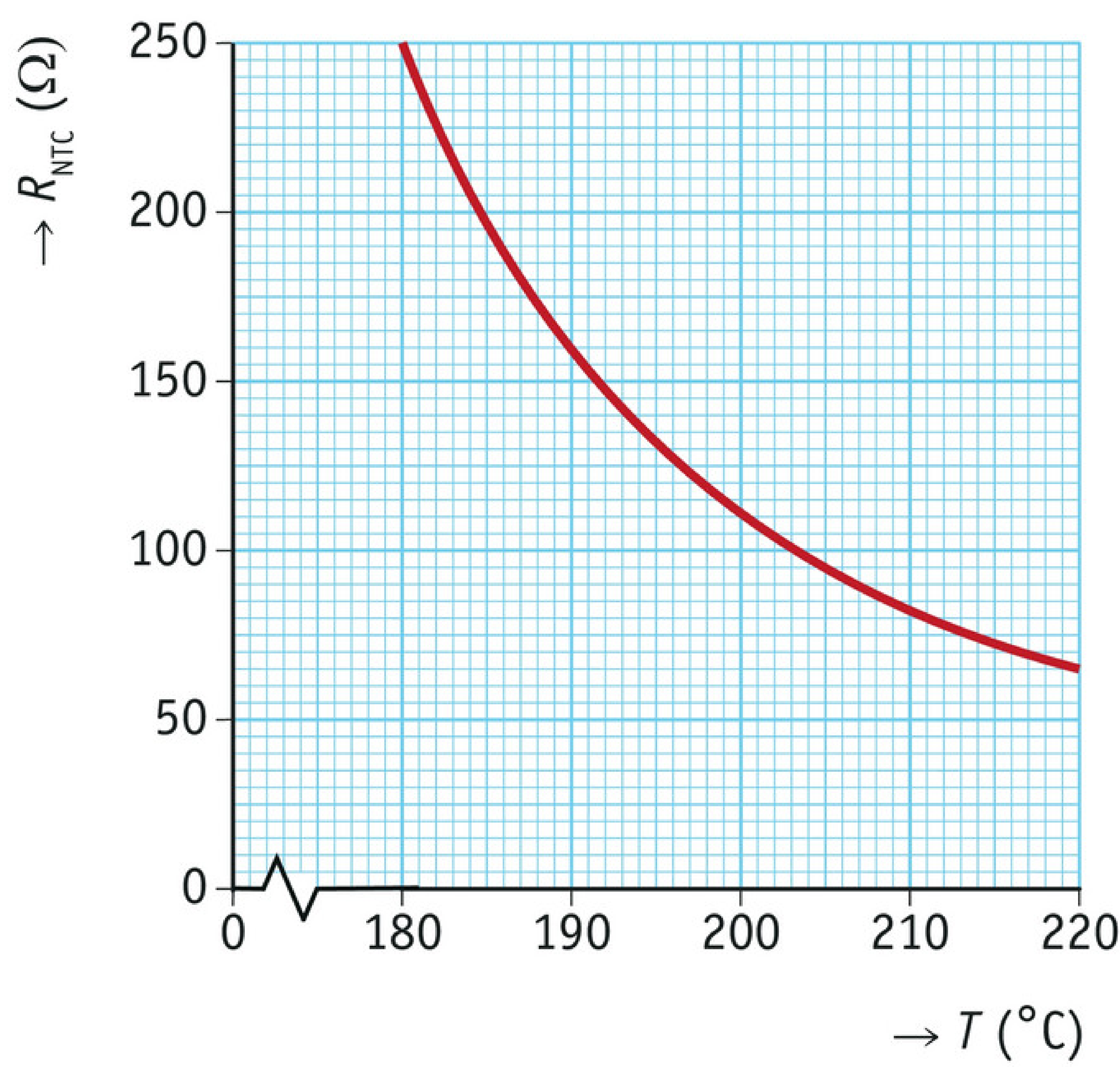

▲ **figuur 11** het ijkdiagram van de lichtsensor van figuur 10

**+11** Sterilisatie

Injectienaalden en medische instrumenten moeten altijd worden gesteriliseerd. Een van de gebruikte sterilisatiemethoden is *heteluchtsterilisatie*. Hierbij worden de instrumenten in een sterilisatieapparaat gedurende één uur blootgesteld aan hete lucht van 180 °C. In het sterilisatieapparaat zit een temperatuursensor: een NTC en een vaste weerstand in serie aangesloten op een spanningsbron.

**a** Teken deze schakeling.

Bij de NTC hoort het ijkdiagram van figuur 12. De (vaste) weerstand in de schakeling is 200 Ω en de spanningsbron geeft 5,0 V.




▲ **figuur 12** het verband tussen de weerstand van de NTC en de temperatuur

**b** Vul tabel 1 helemaal in.

▼ **tabel 1** spanningen bij verschillende temperaturen

| temperatuur (°C) | weerstand van NTC (Ω) | spanning over NTC (V) | spanning over weerstand (V) |
|---|---|---|---|
| 180 | | | |
| 200 | | | |

Bij een temperatuursensor ligt het voor de hand dat de spanning die hij afgeeft, toeneemt als de temperatuur hoger wordt. Je wilt op de schakeling van opdracht a een spanningsmeter aansluiten die de sensorspanning meet.

**c** Moet je die spanningsmeter aansluiten op de NTC of op de weerstand? Licht je antwoord toe.

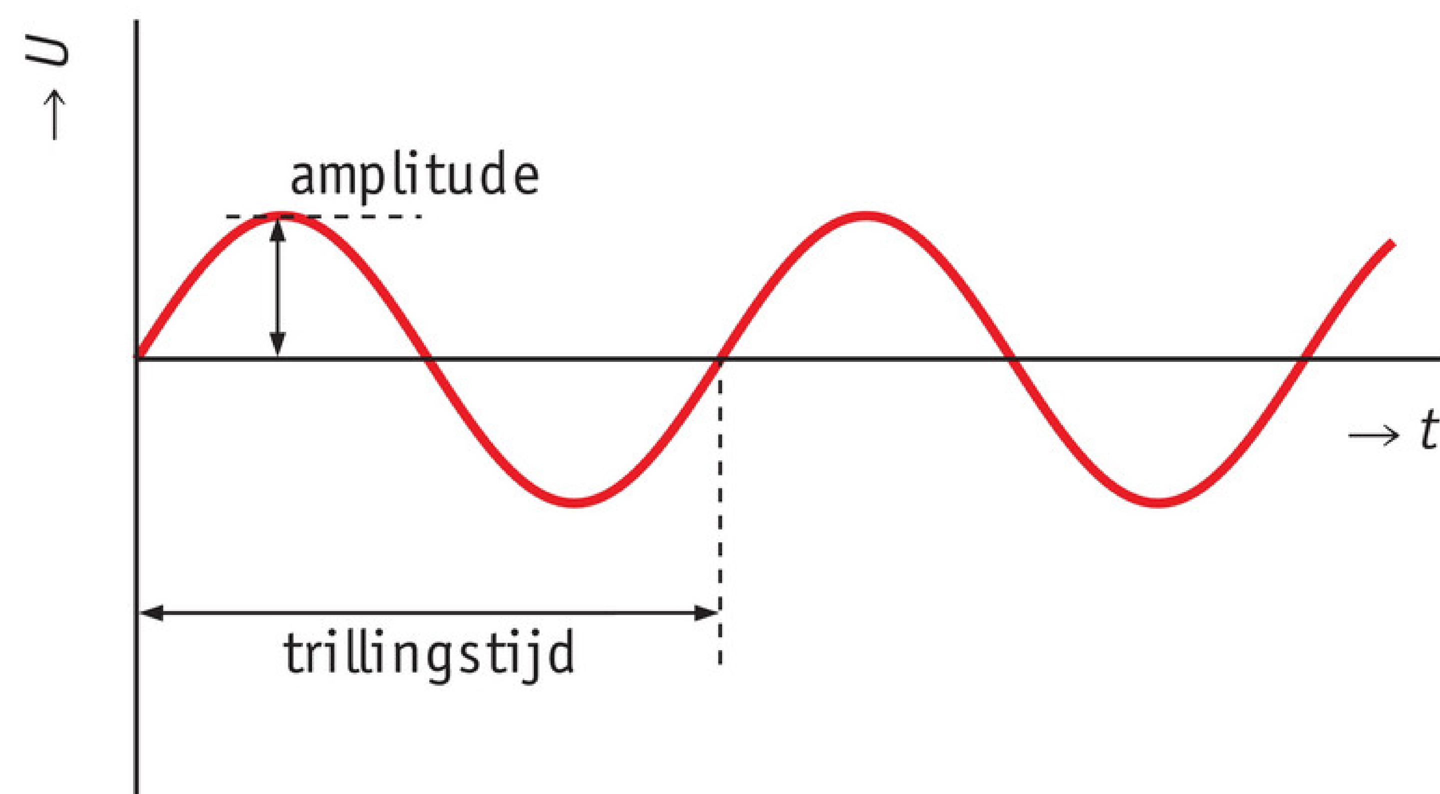
# 3 Signalen

In deze paragraaf leer je:
- verschillende soorten signalen kennen (analoog, discreet, binair);
- decimale getallen omrekenen in binaire getallen en omgekeerd;
- de werking van een AD-omzetter kennen.

De onderdelen van een systeem moeten informatie aan elkaar kunnen doorgeven. Dat gaat tegenwoordig meestal met behulp van elektrische signalen. Die signalen kun je indelen in twee categorieën.

## Signaalspanning

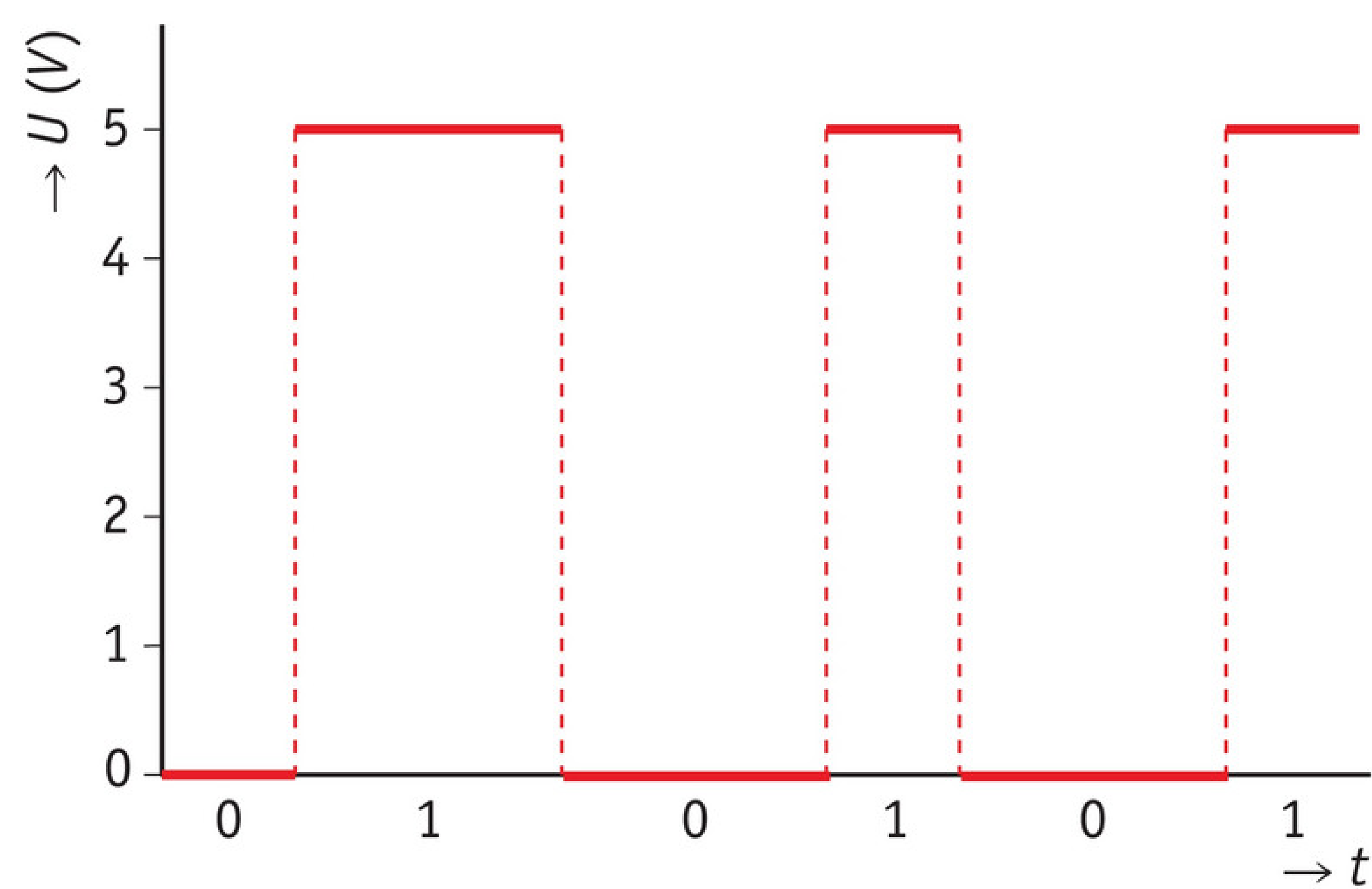
De spanning die een sensor afgeeft, heet signaalspanning of kortweg **signaal**. Dit signaal bevat informatie over de grootheid die met de sensor wordt gemeten. Ook vanuit het verwerkingsdeel van een systeem gaan signalen. Die signalen gaan naar het uitvoerdeel.
Niet elke spanning is een signaalspanning. De spanning die over de polen van een batterij staat, is geen signaalspanning. Deze spanning geeft geen informatie, maar is uitsluitend bedoeld om energie te leveren, bijvoorbeeld aan een lampje. De spanning die een microfoon afgeeft, is wel een signaalspanning. Deze verandert namelijk als het geluid verandert. Als je een stemvork bij een microfoon houdt en je slaat de stemvork aan met een hamertje, dan is het signaal dat uit de microfoon komt een sinusvormige wisselspanning zoals in figuur 13. De amplitude van het signaal zegt iets over de sterkte van het geluid. De trillingstijd, en dus ook de frequentie, zegt iets over de toonhoogte. Er zit dus op twee manieren informatie in dit signaal.




▲ **figuur 13** Het signaal dat bij een zuivere toon uit een microfoon komt, bevat informatie.

## Hoge en lage signalen

Soms bestaan signalen alleen maar uit constante waarden. Dat is bijvoorbeeld het geval bij een drukschakelaar (er zitten er twee links op het systeembord): als je de schakelaar indrukt, is er een spanning van 5 V en anders is de spanning nul. Op het systeembord is de spanning altijd tussen 0 en 5 V. Je kunt de spanning van 5 V ook aanduiden met ‘hoog’ en die van 0 V met ‘laag’.
In computers zitten ook miljoenen schakelaartjes, op computerchips. Een computer kan informatie alleen verwerken in de vorm van ‘hoge’ en ‘lage’ signalen; deze worden meestal aangeduid met ‘1’ en ‘0’.
Als er maar twee mogelijkheden zijn voor een signaal, dan wordt dat een **binair** signaal genoemd. In figuur 14 zie je een binair signaal. Onderaan zie je een stroom van enen en nullen. Daarmee kun je bijvoorbeeld ‘normale’ getallen of letters doorgeven.




▲ **figuur 14** een binair signaal

## Decimaal en binair

De getallen waarmee jij rekent, bestaan uit de symbolen 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 en 9. Het getal 165 begrijp jij direct, maar de computer 'begrijpt' dat getal niet. De getallen waar wij mee rekenen zijn **decimaal** (tientallig) en in computers moeten die worden omgezet in binaire getallen (tweetallig).

Zowel in decimale als in binaire getallen bepaalt de plaats van een cijfer hoeveel het 'waard' is. Je begint daarbij de plaatsen vanaf rechts te nummeren.

Het getal 165 betekent dus eigenlijk:

$5 \times 10^0 + 6 \times 10^1 + 1 \times 10^2 = 5 + 60 + 100$ (zie voorbeeld 1 in tabel 2).

Het binaire getal 1011 (zie voorbeeld 2 in tabel 2) kun je op deze manier omrekenen naar een decimaal getal:

$1 \times 2^0 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^3 = 1 + 2 + 0 + 8 = 11$

Je ziet: bij decimale getallen werk je met machten van 10 en bij binaire getallen werk je met machten van 2.

▼ **tabel 2** decimale en binaire getallen

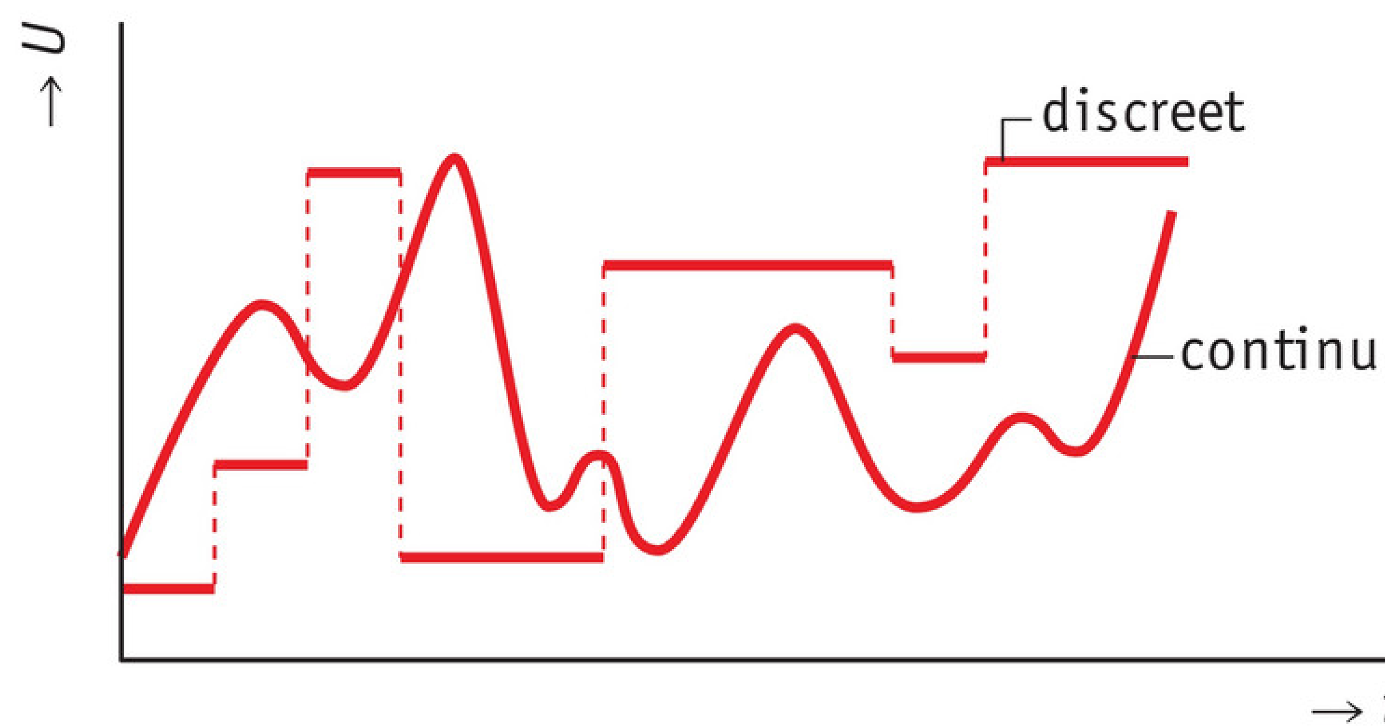
| Plek | enzovoort | 4e | 3e | 2e | 1e |
|---|---|---|---|---|---|
| decimaal stelsel: machten van 10 | enzovoort | $10^3 = 1000$ | $10^2 = 100$ | $10^1 = 10$ | $10^0 = 1$ |
| voorbeeld 1 | | | 1 | 6 | 5 |
| binair stelsel: machten van 2 | enzovoort | $2^3 = 8$ | $2^2 = 4$ | $2^1 = 2$ | $2^0 = 1$ |
| voorbeeld 2 | | 1 | 0 | 1 | 1 |

Andersom kun je ook elk decimaal getal omzetten in een binair getal. In tabel 3 zie je hoe je dat systematisch kunt doen.

▼ **tabel 3** een decimaal getal omzetten in een binair getal

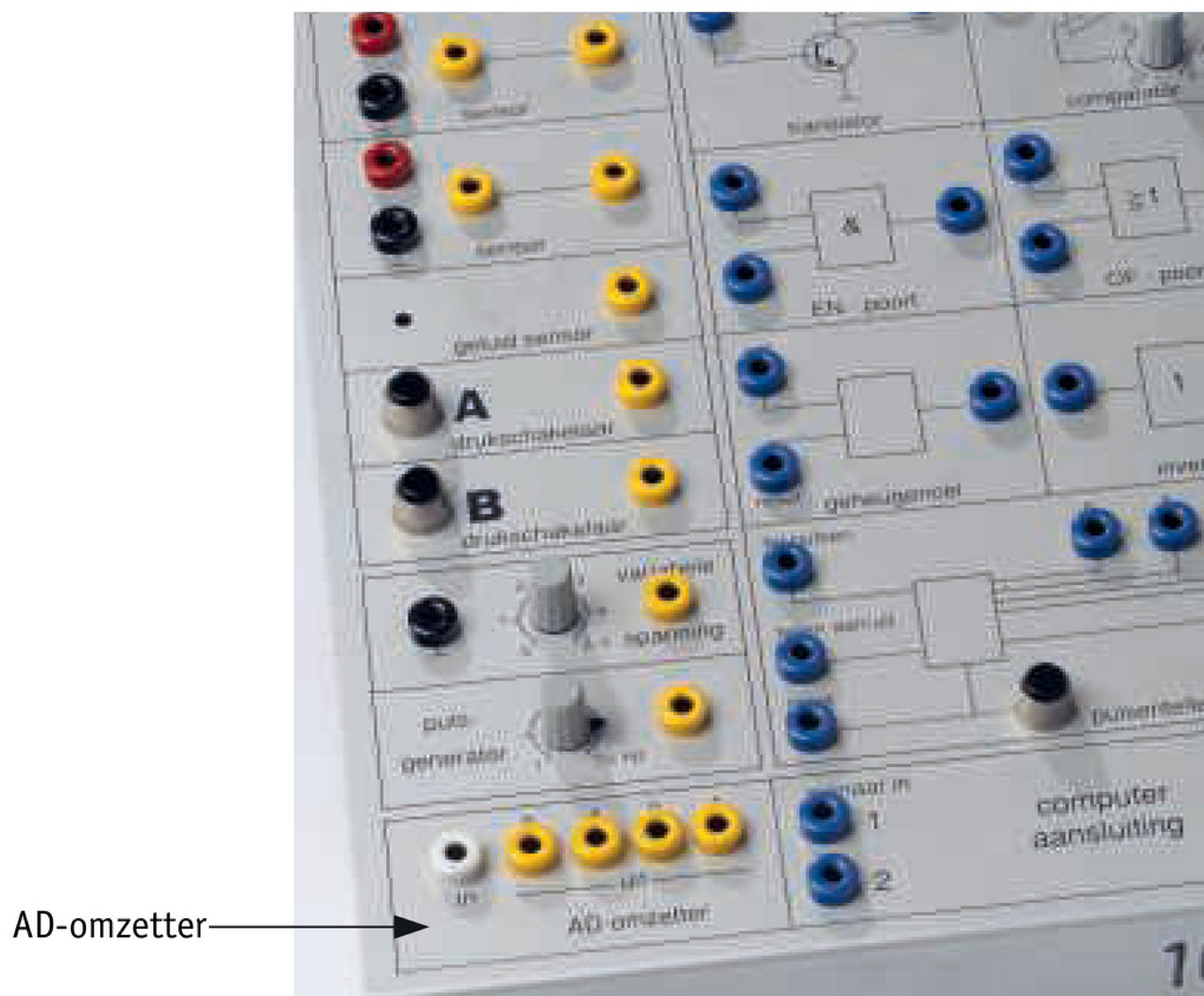
| opdracht: zet 99 om in een binair getal | enzo-voort | $2^6 = 64$ | $2^5 = 32$ | $2^4 = 16$ | $2^3 = 8$ | $2^2 = 4$ | $2^1 = 2$ | $2^0 = 1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Stappen | | | | | | | | |
| stap 1: vind de grootste macht van 2 die in je getal past | | dat is 64 | | | | | | |
| stap 2: trek die grootste macht van je getal af | | 99 − 64 = 35 | | | | | | |
| stap 3: vind de grootste macht van 2 die in het overgebleven getal past | | | dat is 32 | | | | | |
| stap 4: zie stap 2 | | | 35 − 32 = 3 | | | | | |
| stap 5: zie stap 3 | | | | | | | dat is 2 | |
| stap 6: zie stap 2 | | | | | | | 3 − 2 = 1 | |
| stap 7: zie stap 3 | | | | | | | | dat is 1 |
| stap 8: zie stap 2 | | | | | | | | 1 − 1 = 0 |
| stap 9: noteer een 1 als je de macht van 2 gebruikt hebt en anders een 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Meer in het algemeen wordt een signaal dat maar een beperkt aantal ‘standen’ kent, een **discreet** signaal genoemd. Een signaal dat alle waarden kan aannemen (binnen een bepaald gebied), wordt een **analoog** of **continu** signaal genoemd. In figuur 15 zie je hoe je deze signalen kunt herkennen.




▲ **figuur 15** een discreet en een continu signaal

Uit veel sensoren komt een continu signaal. Soms is het nodig om dat signaal om te zetten in een digitaal (binair) signaal. Dat kan met een **AD-omzetter** (A = analoog, D = digitaal). Op het systeembord zit linksonder zo’n omzetter (figuur 16).




▲ **figuur 16** de AD-omzetter op het systeembord

Deze AD-omzetter wordt 4-bits genoemd, omdat hij vier uitgangen heeft. Elke uitgang kan een hoog of laag signaal geven (een 1 of een 0).
Aan de ingang kan een analoog signaal tussen de 0,0 en 5,0 V de omzetter in. Aan de uitgang kunnen zestien verschillende binaire getallen uit de omzetter komen: $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$. Deze zestien getallen worden binaire codes genoemd. Het 5,0 V grote interval aan de ingang moet dus worden verdeeld in zestien intervallen aan de uitgang. Elk van die intervallen bij de uitgang moet dus $\frac{5{,}0\ \text{V}}{16} = 0{,}3125$ V groot zijn. Dit wordt de **stapgrootte** of **resolutie** genoemd. Het eerste interval bij de ingang loopt van 0 tot 0,3125 V en krijgt de binaire code 0000. Het tweede interval loopt van 0,3125 tot 0,625 V en krijgt de code 0001, enzovoort.

**Voorbeeldopgave 1**

Welke bits van de 4-bits AD-omzetter geven een hoog signaal bij een ingangssignaal van 2,9 V?

*Uitwerking*
Je moet de binaire code kennen van het interval waar 2,9 V in zit. Je kunt eerst alle intervallen gaan opschrijven (0 tot 0,3125 V; 0,3125 tot 0,625 V; enzovoort) en dan kijken waar 2,9 V in zit, maar dat kost veel tijd. Handiger is om het ingangssignaal te delen door de stapgrootte:

$\frac{2{,}9\ \text{V}}{0{,}3125} = 9{,}28$. Dit betekent dat 2,9 V in het 10e interval zit (en dus niet in het 9e!).

Aangezien het 1e interval overeenkomt met het decimale getal 0, komt het 10e interval overeen met het getal 9.
Je moet dus het decimale getal 9 omzetten in een binair getal:
1001 (want $1 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^3 = 9$). Dat betekent dat de twee buitenste bits een hoog signaal zullen geven.

## Onthoud!

- Tussen de blokken van een systeem lopen signalen waarmee informatie wordt doorgegeven.
- Als een signaal maar twee standen kent (zoals bij een schakelaar), dan heet dat signaal binair. Hoog en laag worden aangegeven met 1 en 0.
- Binaire getallen bestaan alleen uit nullen en enen. Je kunt decimale en binaire getallen in elkaar omzetten.
- Een signaal dat maar een paar standen kent, heet discreet. Als een signaal alle waarden kan aannemen, dan heet het signaal analoog of continu.
- Een AD-omzetter kan een analoog signaal omzetten in een binaire code.

## Opdrachten

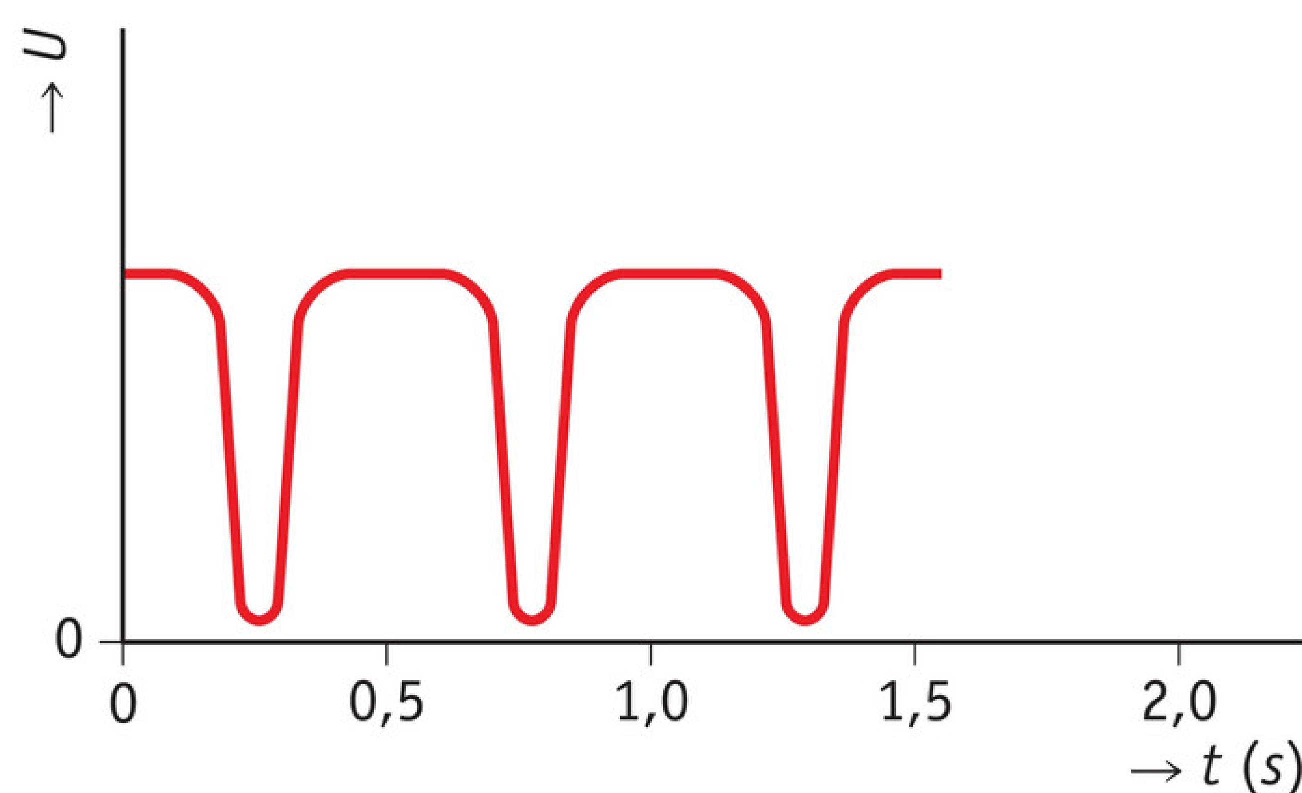
**12** Signalen [1]
Er zijn verschillende soorten signalen.
**a** Leg met een schets uit wat het verschil is tussen een continu en een discreet signaal.
**b** Leg uit dat een binair signaal een voorbeeld is van een discreet signaal.
**c** Leg uit dat uit een fietsdynamo geen signaalspanning komt.

**13** Signalen [2]
Wat voor signaal (continu; discreet maar niet binair; binair) hoort bij:
**a** de tonen van een piano?
**b** een lichtsensor?
**c** een dobbelsteen?
**d** een lichtschakelaar?
**e** het waterniveau in een stortbak van het toilet?
**f** een microfoon?
**g** het alarm van een rookmelder?
**h** de tijd die een klok met wijzers aangeeft?

**14** Binair en decimaal
Binaire getallen kun je omrekenen in decimale getallen en andersom.
**a** Reken het decimale getal 110 om in een binair getal.
**b** Reken het binaire getal 110 om in een decimaal getal.

**15** AD-omzetter
Doordat veel signalen analoog zijn, is een AD-omzetter een belangrijk onderdeel bij het werken met apparaten waarin computerchips zitten.
**a** Leg uit waarom een AD-omzetter hier belangrijk is.
**b** Leg uit dat er uit een 8-bits AD-omzetter 256 binaire getallen kunnen komen.
**c** Bereken de stapgrootte van een 8-bits AD-omzetter als het ingangssignaal tussen 0,0 V en 5,0 V ligt.
**d** Welke uitgangen van een 8-bits AD-omzetter geven een hoog signaal bij een ingangssignaal van 2,4 V?

**+16** Lopende band
Op een lopende band komen pakken melk voorbij, zoals de flessen in figuur 10. De melkpakken worden geteld met behulp van een lichtsensor. De pakken komen netjes achter elkaar voorbij en de afstand tussen twee pakken is 20 cm. Het signaal dat uit de sensor komt, ziet eruit als in figuur 17. Voor de lichtsensor geldt: hoe meer licht erop valt, hoe sterker het signaal dat eruit komt.




▲ **figuur 17** het signaal van de lichtsensor bij een lopende band met melkpakken

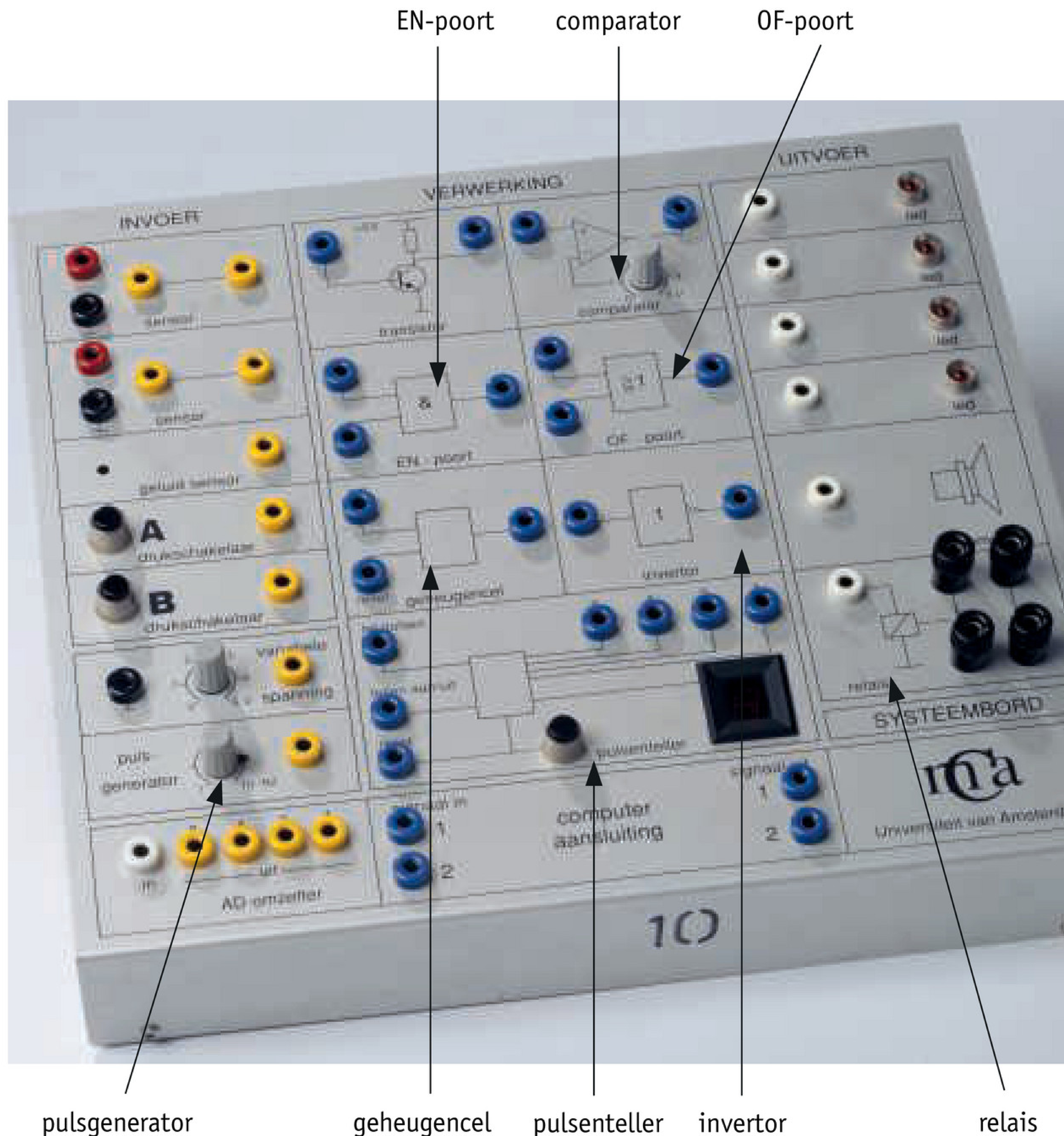
**a** Verklaar het signaal van figuur 17. Hoe kun je zien wanneer er een pak melk voorbijkwam?
**b** Bepaal met behulp van figuur 17 de snelheid van de lopende band.
**c** Bepaal de breedte van een melkpak.
**d** Leg uit hoe het signaal van figuur 17 zal veranderen als de lopende band twee keer zo snel zou bewegen.

# 4 Verwerkers en actuatoren

In deze paragraaf leer je:
- de werking van verschillende soorten verwerkers kennen;
- hoe je deze verwerkers toepast in een automatisch systeem;
- een aantal actuatoren en hun toepassing kennen.

De signalen die uit het invoerdeel komen, kunnen niet direct naar het uitvoerdeel. Eerst moeten ze worden bewerkt: er moeten andere signalen van worden gemaakt. Dat kan op verschillende manieren. Met continue signalen kun je andere dingen doen dan met binaire signalen.

Er zijn twee soorten verwerkers in het verwerkingsdeel van het systeembord (figuur 18). Sommige kunnen alle soorten signalen verwerken (de comparator), andere alleen binaire signalen.




▲ **figuur 18** de verwerkers (blauw) op het systeembord, de pulsgenerator (links) en het relais (rechts)

▶ **EXPERIMENT 2** Een stil alarm

▶ **EXPERIMENT 3** Automatische temperatuurregeling

## Comparator

Bij stuur- en regelsystemen wordt vaak een **comparator** gebruikt. Je vindt hem bovenaan in het midden van het systeembord. Deze verwerker vergelijkt (denk aan het Engelse werkwoord *to compare*) de waarde van de spanning die van een sensor komt met een kritische of gewenste waarde. Die waarde kun je op het systeembord instellen met de draaiknop van de comparator. Bij die knop staat $U_{ref}$ (referentiespanning). Als je het ijkdiagram van de sensor kent, dan kun je daaruit de referentiespanning halen.

Je vindt de comparator onder andere bij systemen waarin de temperatuur op een bepaald niveau moet worden gehouden (oven, huiskamer). Je stelt als gebruiker in hoe hoog de temperatuur moet zijn. Een sensor meet voortdurend de temperatuur en stuurt de waarde daarvan door naar de comparator in de vorm van een elektrische spanning. Als de gemeten waarde groter is dan de ingestelde waarde, dan komt er een hoog signaal (een 1) uit de comparator. Anders komt er een 0 uit. Een comparator is bedoeld voor een analoog ingangssignaal en heeft een binair uitgangssignaal.

De meeste verwerkers van het systeembord kunnen niets met analoge signalen. Zij kunnen alleen iets met nullen en enen. Daarom worden ze logische componenten genoemd (in de logica werkt men alleen met 'waar' en 'niet waar'). De vier logische componenten die op het systeembord voorkomen, worden hierna beschreven.

## Logische poorten

De EN-poort en de OF-poort lijken op elkaar. Hun symbolen vind je op het systeembord (figuur 18). Bij beide moeten twee binaire signalen naar binnen en komt er één binair signaal uit. Beide worden ingezet als er in het systeem twee of meer signalen tegelijk moeten worden onderzocht. Bij de **EN-poort** zal er op de uitgang alleen een 1 staan als beide ingangen ook een 1 zijn. Je gebruikt hem bijvoorbeeld voor een buitenlamp bij een voordeur die aan moet gaan als (a) het donker is en (b) er iemand bij de voordeur staat. Bij de **OF-poort** zal de uitgang altijd een 1 zijn, behalve als beide ingangen 0 zijn.
Je kunt de werking van dit soort poorten weergeven met een waarheidstabel. In zo'n tabel zijn de eerste twee kolommen de ingangssignalen (0 of 1) en de laatste kolom geeft het uitgangssignaal (ook 0 of 1). De waarheidstabellen van de EN- en OF-poort staan gecombineerd in tabel 4.

▼ **tabel 4** waarheidstabel van de EN-poort en de OF-poort

| ingang 1 | ingang 2 | uitgang EN-poort | uitgang OF-poort |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

Een **invertor** (of NIET-poort) heeft maar één ingang. Hij maakt van een 0 een 1 en van een 1 een 0. Je vindt hem onder de OF-poort op het systeembord (figuur 18).

***Opmerking***
De symbolen van bijna alle verwerkers en de waarheidstabellen van de logische poorten zijn vermeld in Binas tabel 17C.

## Geheugencel

In sommige schakelingen is het noodzakelijk om te onthouden dat zich een bepaalde 'gebeurtenis' heeft voorgedaan. Stel dat een inbreker een huis met een alarmsysteem via een raam binnendringt. Het mag dan natuurlijk niet zo zijn dat het alarm alleen even aan is als de inbreker door het raam klimt. De gebeurtenis 'iemand klimt door het raam' moet worden onthouden en dat kan met een geheugencel.
Een **geheugencel** heeft net als de EN- en de OF-poort twee ingangen: set en reset. Je vindt hem onder de EN-poort op het systeembord (figuur 18). De uitgang is normaal laag. Als de set-ingang hoog wordt, dan wordt de uitgang ook hoog. De uitgang blijft hoog, ook als de set-ingang weer laag wordt. Je kunt de uitgang weer laag maken door de reset-ingang hoog te maken. Als beide ingangen hoog zijn, dan 'wint' de set-ingang en is de uitgang dus hoog.

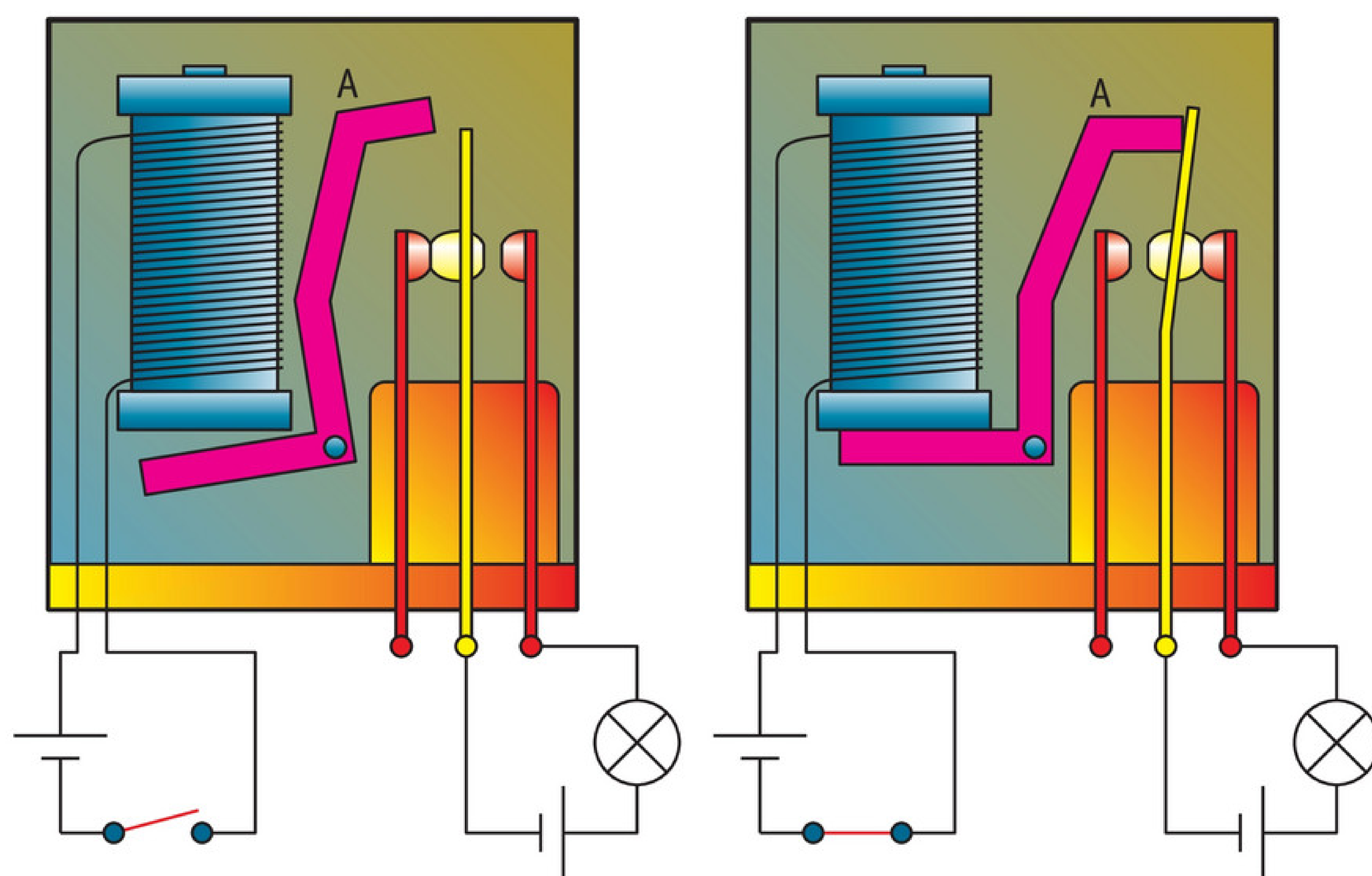
## Pulsenteller

Eerder kwam de buitenlamp al aan de orde. Het is niet nodig dat deze bij iedere voorbijganger aangaat. Je kunt bijvoorbeeld als eis stellen dat de lamp pas aangaat als iemand langer dan bijvoorbeeld 10 s bij de voordeur staat. In dit soort gevallen gebruik je een teller.
Op het systeembord vind je onderaan in het midden een **pulsenteller** (figuur 18). Deze heeft drie ingangen en vier uitgangen. Bovendien heeft hij een display waarop een cijfer te zien is. Als het signaal op de ingang *tel pulsen* van laag naar hoog gaat, springt de teller met één omhoog. Maar dat zal hij alleen doen als er geen laag signaal op de ingang *aan/uit* staat. Alleen als op *aan/uit* een hoog signaal of helemaal geen signaal staat, kan de teller tellen. Als je op de ingang

reset een hoog signaal geeft, dan wordt de teller op 0 gezet. Zolang er een hoog signaal op reset blijft staan, blijft de teller op nul staan. Op het systeembord zit een drukschakelaar naast de reset waarmee je de teller direct op 0 kunt zetten.
Op het display kun je de stand van de teller decimaal aflezen. Met de vier uitgangen (ook wel bits genoemd) kun je de stand van de teller als binair getal ‘lezen’. Dan moet je deze uitgangen wel aansluiten op bijvoorbeeld de ledlampjes rechtsboven op het systeembord.
Als je een systeem wilt maken waarin bijvoorbeeld na 10 s pas iets mag gebeuren, dan is het handig om de pulsgenerator van het systeembord te gebruiken. Deze vind je linksonder op het systeembord (figuur 18). De frequentie waarmee de generator pulsen (spanningspiekjes) afgeeft, kun je zelf instellen. Als je de pulsgenerator bijvoorbeeld op 10 Hz zet, dan geeft hij om de $\frac{1}{10} = 0{,}10$ s een puls.

## Actuator

Nadat de signalen van de sensoren door de verwerkers zijn verwerkt, gaan er signalen naar het uitvoerdeel van het systeem. Onder bepaalde voorwaarden zal er dan iets gebeuren bij de uitvoer. De onderdelen die daarbij betrokken zijn, worden actuatoren genoemd. Het systeembord heeft een paar verschillende actuatoren: leds, een zoemer en een relais. Wat een led en een zoemer kunnen, is wel duidelijk.
Een **relais** kun je omschrijven als een schakelaar die wordt bediend met een elektromagneet. In figuur 19 zie je hoe het relais werkt. Door het sluiten van schakelaar S gaat er een stroom door de spoel. Deze wordt magnetisch en trekt het anker (A) aan. Daardoor gaat er stroom lopen in de stroomkring rechts. Doordat de rechter stroomkring door een externe spanningsbron wordt gevoed, kun je er een apparaat met een groot vermogen (hoge spanning en/of stroom) mee inschakelen.




▲ **figuur 19** de werking van een relais

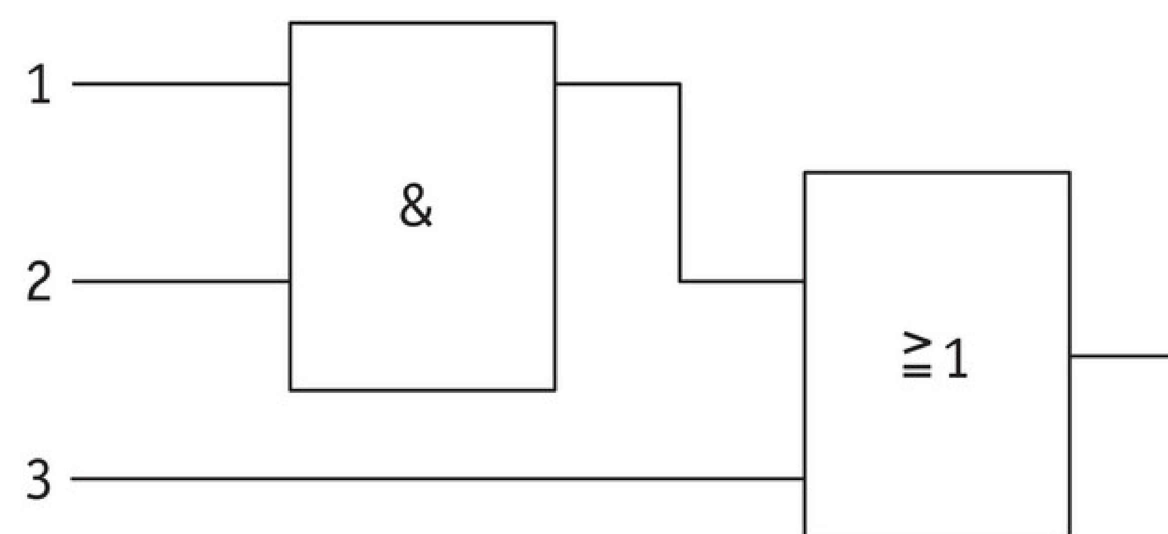
**Onthoud!**

- Een comparator vergelijkt een inkomend (analoog) signaal met een door de gebruiker ingestelde waarde. Hij geeft een binair uitgangssignaal.
- De EN-poort, de OF-poort en de invertor hebben een binair signaal op de ingang(en) nodig. Hun uitgangssignalen vind je in Binas tabel 17C (in de waarheidstabellen).
- De geheugencel slaat een 1 op als er een hoog signaal op de set-ingang komt. Met de reset-ingang zet je hem weer op 0.
- Een pulsenteller gebruik je vaak als klok: je wilt dat iets pas na een bepaalde tijd gebeurt.
- Een relais is een elektromagnetische schakelaar waarmee je een apparaat met een groot vermogen kunt inschakelen.

## Opdrachten

**17** Verwerkers
Er bestaan diverse soorten verwerkers.
Wanneer gebruik je in een systeem:
**a** een comparator?
**b** een invertor?
**c** een pulsenteller?
**d** Vul de volgende zin aan.
Met een relais kun je met een …(1)… vermogen een …(2)… vermogen …(3)… .

**18** Poorten [1]
Het effect van een of meer poorten kun je aangeven met een waarheidstabel.
Geef de waarheidstabel van de volgende poorten.
**a** een OF-poort
**b** een invertor
**c** een EN-poort waarbij vóór een van de ingangen een invertor is geplaatst
**d** de combinatie van poorten in figuur 20 (met drie ingangen!)




▲ **figuur 20** een combinatie van poorten

**19** Poorten [2]
Een EN-poort kun je vergelijken met een schakeling van een batterij, een lampje en twee schakelaars die in serie in de stroomkring zijn opgenomen.
**a** Teken de schakeling en leg uit waarom je deze met een EN-poort kunt vergelijken.
**b** Met welke schakeling (met dezelfde componenten) kun je een OF-poort vergelijken? Teken deze schakeling.

**20** NEN-poort
Er bestaan nog meer poorten dan de EN- en de OF-poort.
Zoek in Binas tabel 17C op wat de NEN-poort doet en leg uit waarin deze verschilt van de EN-poort.

**21** Geheugencel
Op de set van een geheugencel wordt een signaal gezet dat er als volgt uitziet: van 0 tot 1 s hoog (5 V), van 1 tot 2 s laag (0 V), van 2 tot 3 s hoog, van 3 tot 4 s laag, enzovoort. Op de reset wordt het volgende signaal gezet: van 0 tot 2 s laag, van 2 tot 4 s hoog, van 4 tot 6 s laag, enzovoort.
**a** Teken de grafieken van beide signalen liefst met een verschillende kleur in hetzelfde diagram. Zet de spanning langs de *y*-as en de tijd langs de *x*-as. Laat de tijd lopen tot 10 s.
**b** Teken met nog een andere kleur de grafiek van het uitgangssignaal van de geheugencel.

**22** Pulsenteller

Met de pulsenteller op het systeembord kun je een systeem laten tellen.

**a** Tot welk getal kun je maximaal tellen als je alleen het eencijferig display gebruikt?

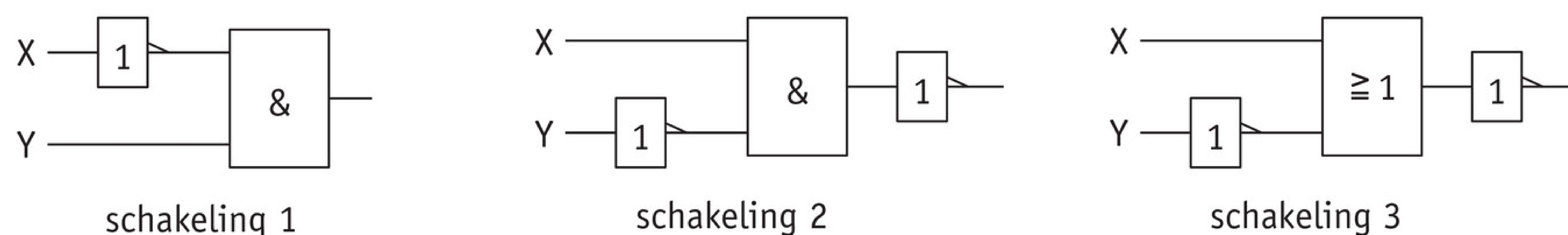
**b** Tot welk getal kun je maximaal tellen als je de vier uitgangen (aangesloten op leds) gebruikt?

**c** Hoeveel uitgangen moet een pulsenteller hebben waarmee je tot minstens 60 kunt tellen?

**d** Op een pulsenteller kun je een pulsgenerator aansluiten. De frequentie van de generator kun je met de hand instellen.
Op welke stand moet je de generator instellen als je om de 0,5 s een puls wilt hebben?

**+23** Buitenlamp

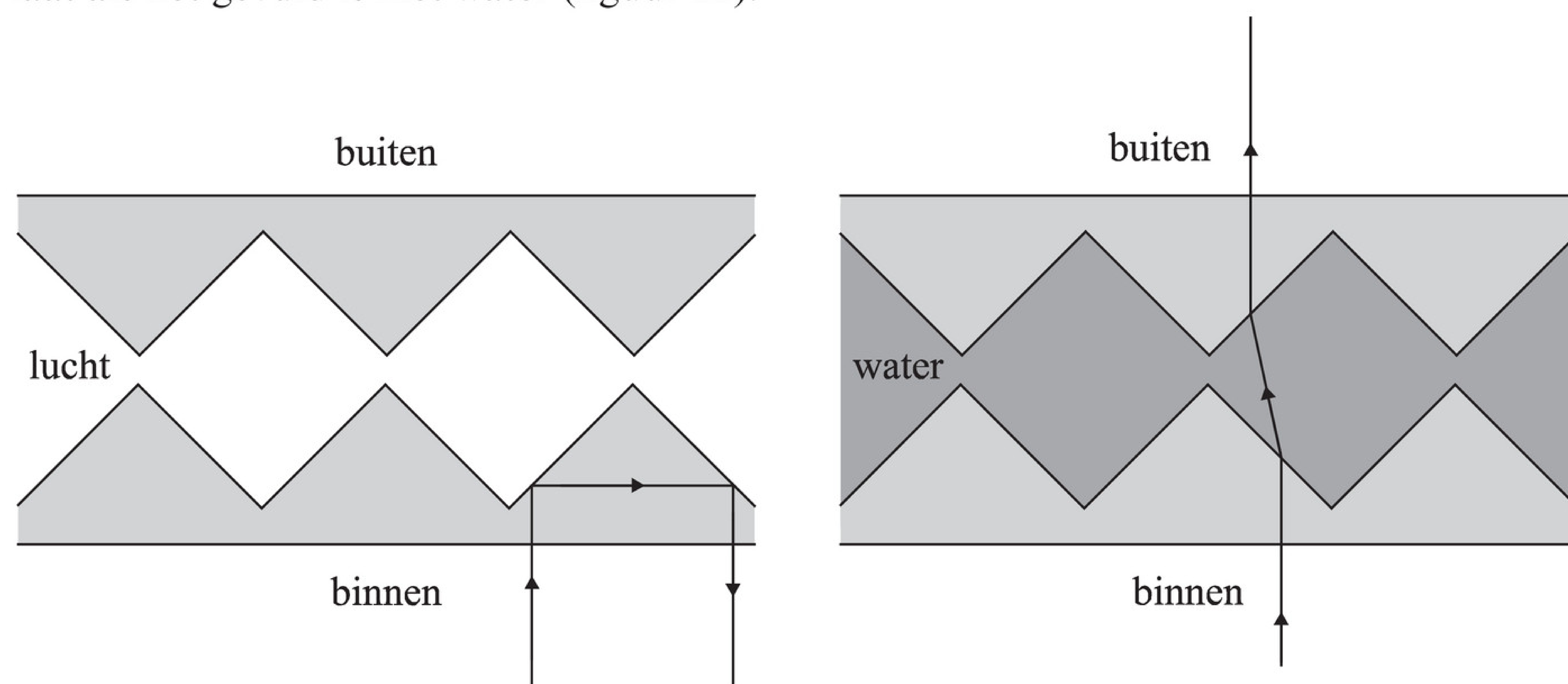
Een buitenlamp moet automatisch aangaan als het donker is én er iemand bij de lamp staat. X is een sensor die een hoog signaal geeft als er licht is. Y is een infraroodsensor die een hoog signaal geeft als er een warmtebron in de buurt is.
In figuur 21 staan drie ontwerpen van een schakeling die mogelijk geschikt is voor dit systeem.
Beredeneer welke van deze drie geschikt is/zijn.




▲ **figuur 21** drie schakelingen voor de buitenlamp

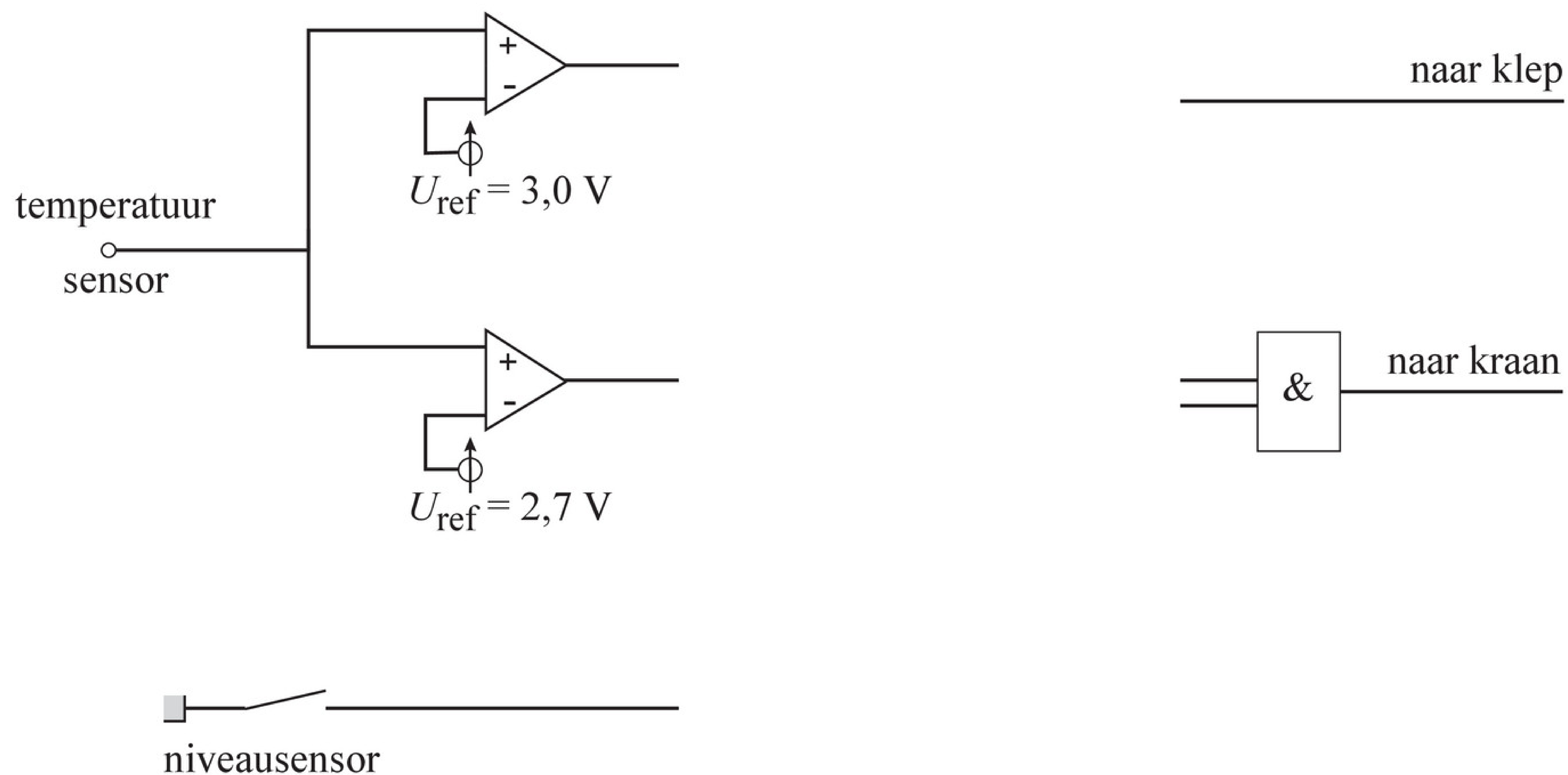
**+24** Solswitch

De Solswitch is een dubbelwandig paneel van doorzichtig kunststof dat alleen licht doorlaat als het gevuld is met water (figuur 22).




▲ **figuur 22** de werking van de Solswitch

De Solswitch kan in het dak van een plantenkas worden gebruikt. Door de panelen kan worden voorkomen dat er 's nachts kunstlicht door het dak van de kas naar buiten schijnt. Op deze manier kan 'lichtvervuiling' worden voorkomen. Als het paneel niet met water gevuld is, gaat een lichtstraal via reflectie terug naar binnen, als het paneel wel gevuld is, gaat de lichtstraal naar buiten (figuur 22).
Voor het vullen en laten leeglopen van de Solswitch wordt een automatisch systeem gebruikt. In figuur 23 is een deel van dit automatische vulsysteem getekend.




▲ **figuur 23** het automatische systeem van de Solswitch

Het vulsysteem heeft twee uitgangen: de klep laat bij een hoog signaal de Solswitch leeglopen, de kraan kan de Solswitch weer vullen. In de beginsituatie is de Solswitch gevuld. Het vulsysteem moet aan de volgende eisen voldoen:

- Als de temperatuur hoger wordt dan 30 °C, wordt er in de Solswitch een klep geopend zodat het water eruit stroomt. De temperatuursensor geeft een hogere spanning als de temperatuur toeneemt.
- Als de temperatuur onder de 25 °C komt, gaat de klep dicht en wordt de kraan geopend. De kraan blijft open totdat een niveausensor (schakelaar) een hoog signaal geeft.

De comparatoren in figuur 23 zijn al op de juiste referentiespanning ingesteld.

**a** Toon aan dat de (lineaire) temperatuursensor in het systeem een gevoeligheid heeft van 0,06 V $°C^{-1}$.

**b** Maak in figuur 23 de schakeling compleet, zodat aan de genoemde eisen is voldaan.

*naar: examen 2013-II*

## Eindopdracht

**25** Intensive care

Lees figuur 24.

### Bewakingsafdeling

De intensive care wordt ook wel de bewakingsafdeling genoemd. De patiënten die hier liggen, worden extra goed bewaakt. Er is hier dan ook speciale apparatuur voor aanwezig. Zo wordt iedere patiënt standaard bewaakt met een elektrocardiogram (ecg) en wordt het zuurstofgehalte (zuurstofsaturatie of verzadiging) in de gaten gehouden. Verder krijgt iedere patiënt een bloeddrukband om de arm of het been om de bloeddruk te bewaken of een slangetje dat de bloeddruk meet. Ook worden onder meer de urineproductie en de temperatuur gemeten.

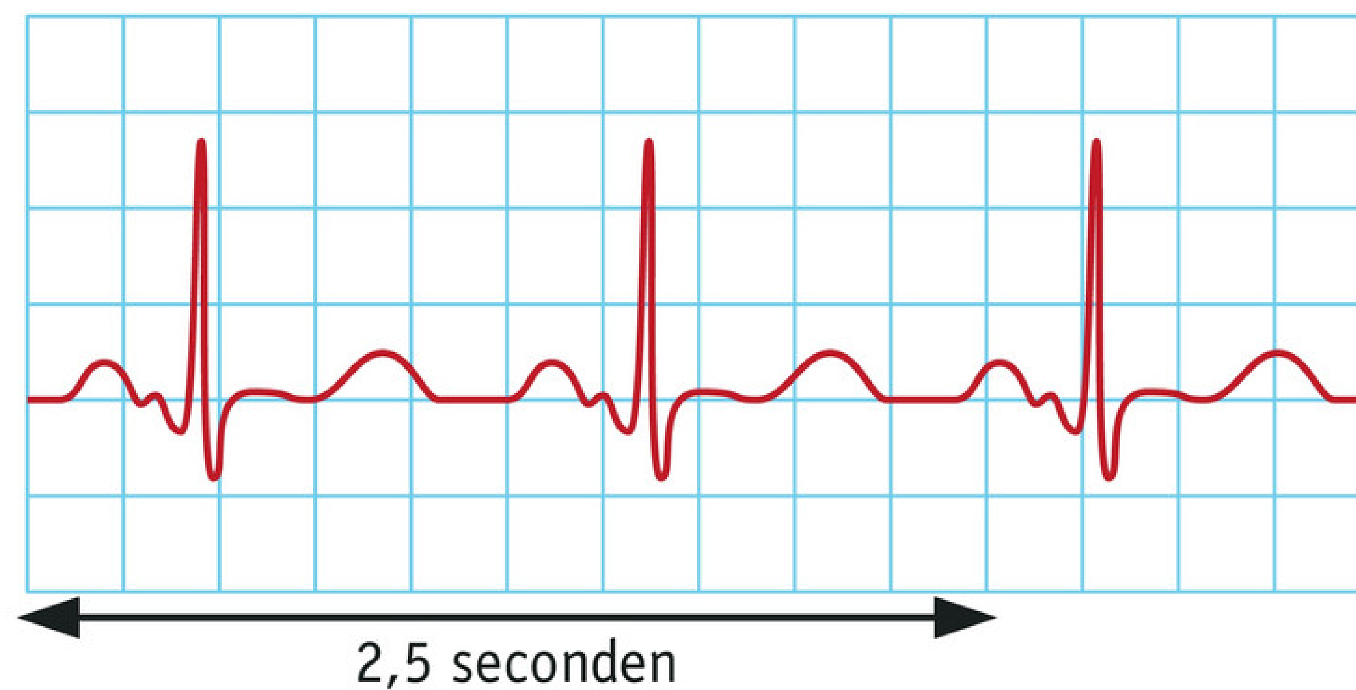
*bron: http://mens-en-gezondheid.infonu.nl/*

◄ **figuur 24**

Een van de grootheden die op de intensive care wordt gemeten, is de *hartslag* van de patiënt (door het opnemen van een cardiogram).

**a** Noem de vier andere grootheden die volgens figuur 24 ook op de intensive care worden gemeten.

**b** In figuur 25 zie je het cardiogram van patiënt P. Karrefiep. Hiermee kun je de 'pols' van deze patiënt bepalen: het aantal hartslagen per minuut.



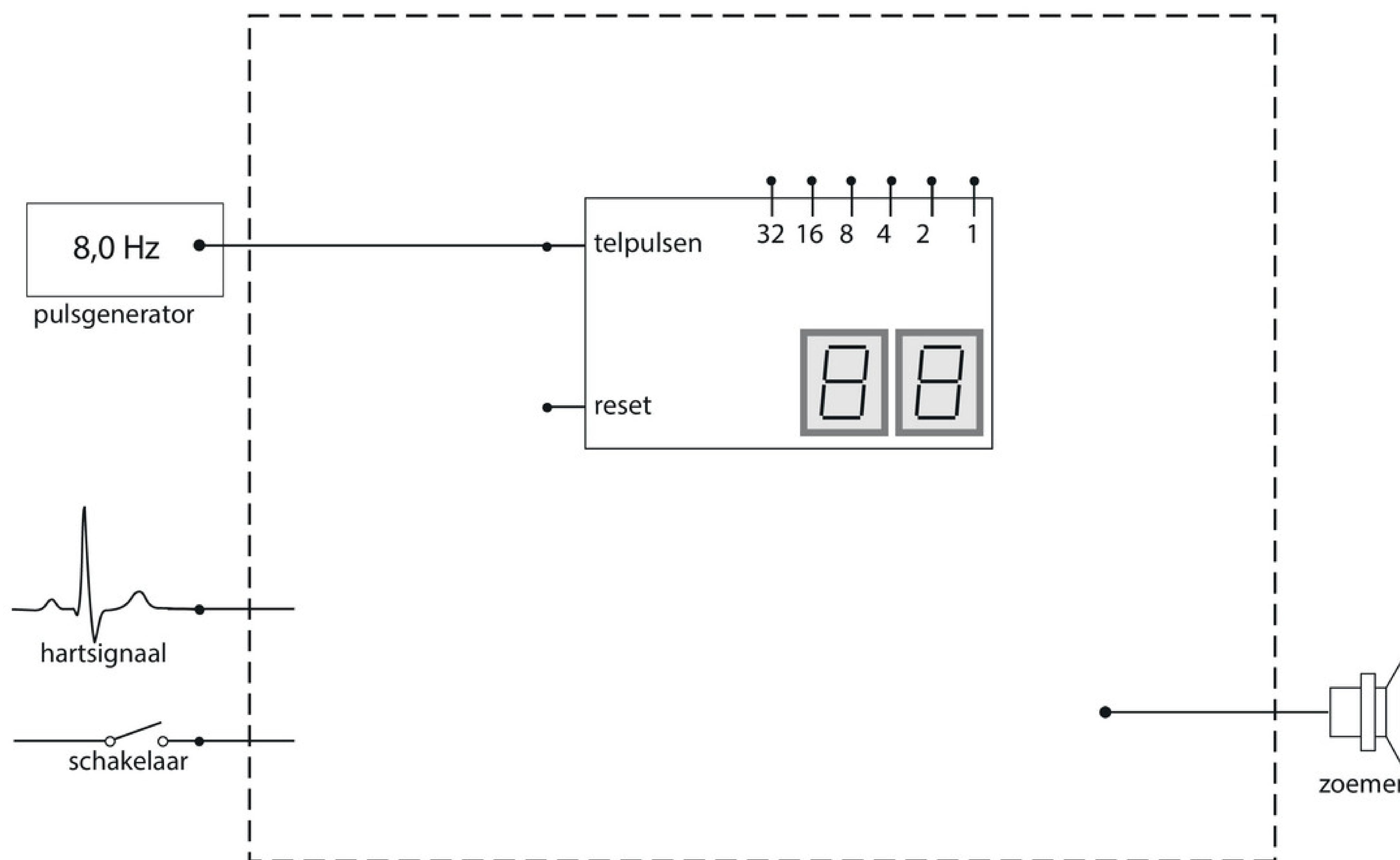

▲ **figuur 25** het opgemeten cardiogram

Bepaal de 'pols' van de patiënt.

**c** Dit cardiogram is verkregen met een 10-bits AD-omzetter (in een computer) waarmee het hartsignaal eerst is omgezet in een digitaal signaal. Het analoge ingangssignaal varieerde hierbij van –0,35 mV tot +1,25 mV.
Bereken de resolutie (stapgrootte) van deze AD-omzetter.

**d** De computer is een onderdeel van een automatisch systeem voor hartbewaking. Wanneer dit systeem gedurende 3,0 s geen piek registreert, klinkt een zoemer. Deze blijft in werking totdat iemand het systeem uitschakelt.
Leg uit of dit automatische systeem een meetsysteem, een stuursysteem of een regelsysteem is.

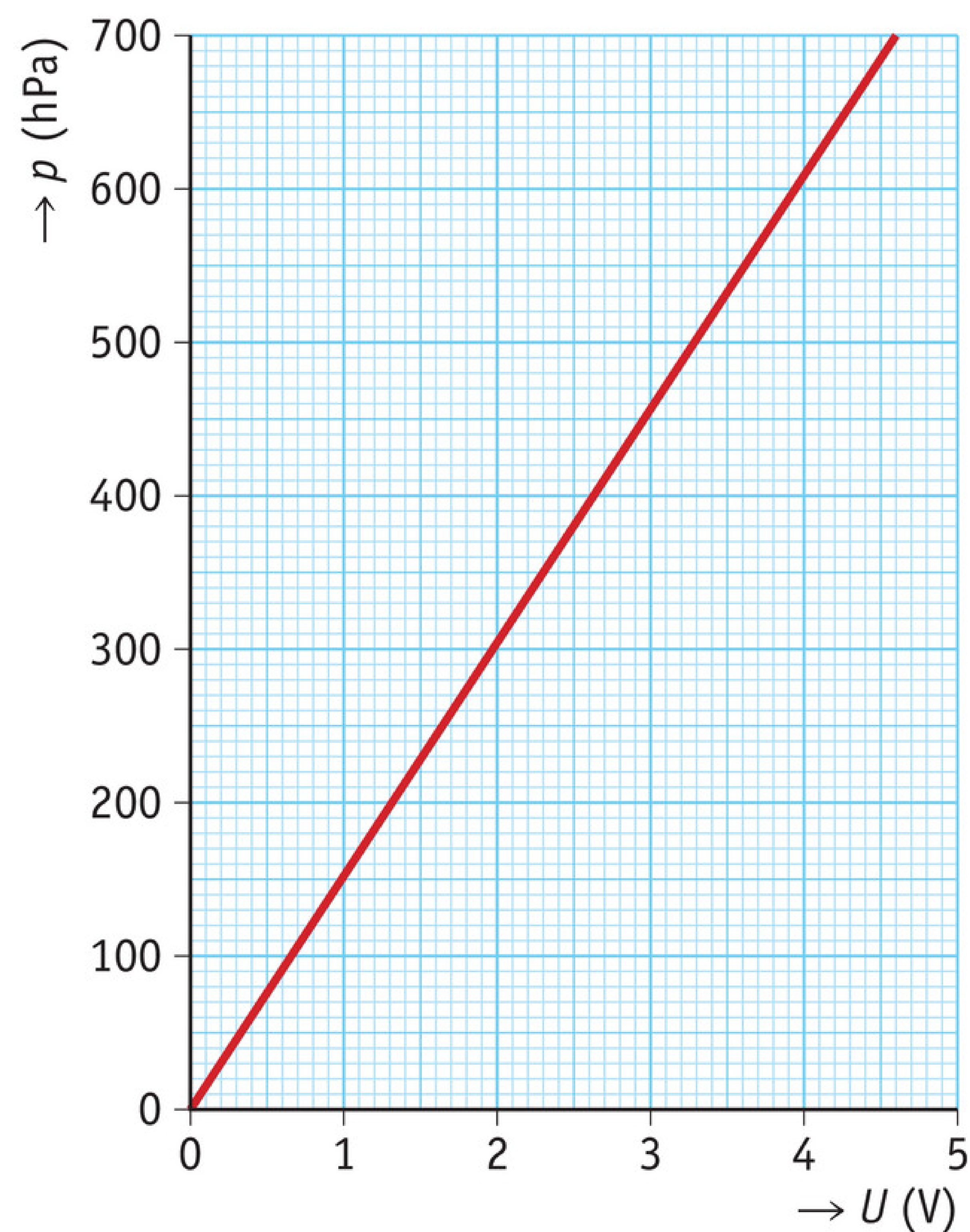
In figuur 26 zijn enkele onderdelen van het automatische systeem getekend. Er ontbreken nog enkele verwerkers. Ook zijn nog niet alle verbindingen getekend. De pulsgenerator is ingesteld op een frequentie van 8,0 Hz.




▲ **figuur 26** het automatische systeem voor hartbewaking

**e** Teken in figuur 26 de ontbrekende verwerkers en de benodigde verbindingen om het automatische systeem goed te laten werken.

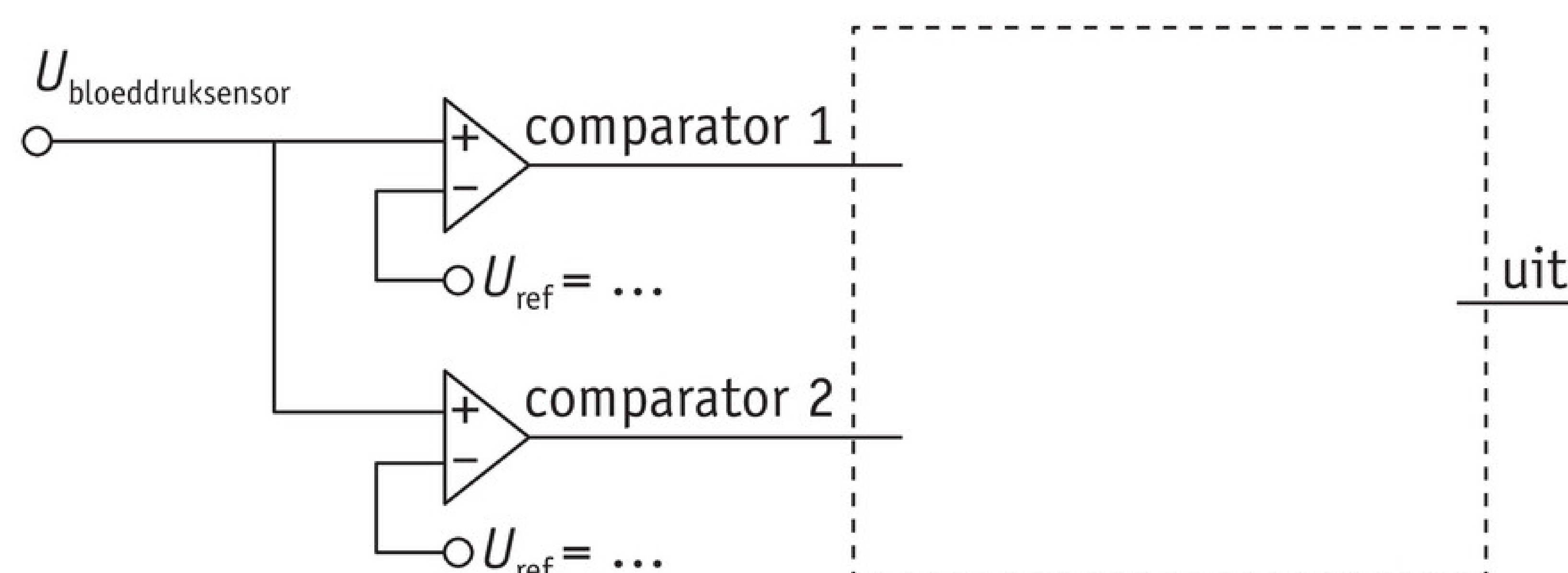
**f** Ook de bloeddruk van de patiënt wordt nauwkeurig in de gaten gehouden. Een vereenvoudigd geautomatiseerd systeem hiervoor kun je op het systeembord nabootsen met een druksensor. In figuur 27 zie je het ijkdiagram van de druksensor.




▲ **figuur 27** het ijkdiagram van de bloeddruksensor

Bepaal de gevoeligheid van de druksensor in het lineaire gebied.

**g** Een van de eisen waaraan het systeem op de intensive care moet voldoen is:
Als de bloeddruk onder de 80 mm Hg (millimeter kwikdruk) komt of boven de 150 mm Hg, moet er een alarm (zoemer) afgaan. (De zoemer hoeft niet aan te blijven als de bloeddruk weer tussen de 80 mm Hg en 150 mm Hg ligt.) In figuur 28 zie je een deel van het systeem.




▲ **figuur 28** Welke verwerkers ontbreken nog?

Teken in figuur 28 de ontbrekende onderdelen zodat het systeem voldoet aan de eis. Geef ook aan op welke waarden de referentiespanningen van de twee comparatoren moeten worden ingesteld. (In Binas tabel 5 vind je hoe je mm Hg moet omrekenen naar pascal).

*naar: examen vwo natuurkunde 1, 2003-I*

**Maak de online diagnostische toets (Test jezelf).**

# 5 Practicum

**Algemene instructie**
Bij alle experimenten heb je het systeembord en verbindingssnoeren nodig. Deze zijn verder niet meer bij de benodigdheden vermeld.
Als vuistregel geldt dat je uitgangen alleen met ingangen mag verbinden. Verbind dus nooit uitgangen met elkaar, want dan werken de onderdelen van het systeembord niet meer correct.

## EXPERIMENT 1 De temperatuursensor (apparatuurpracticum)

**Inleiding**
Elke sensor heeft een ijkdiagram. Daaruit kun je aflezen hoe groot de spanning is die hij afgeeft bij een bepaalde waarde van de te meten grootheid. Bovendien kun je de gevoeligheid van de sensor uit de ijkgrafiek halen.

**Onderzoeksvraag**
Hoe groot is de gevoeligheid van een temperatuursensor?

**Benodigdheden**
temperatuursensor; spanningsmeter of multimeter; maatbeker met water; thermometer

**Uitvoering**
- Sluit de sensor aan op het systeembord.
- Meet met de meter de signaalspanning van de sensor bij vijf verschillende temperaturen tussen de 10 en 50 °C. Zet je metingen in een tabel.

**Verwerking**

1 Maak met je meetwaarden het ijkdiagram van de sensor.
2 Is de ijkgrafiek lineair?
3 Wat kun je zeggen over het bereik van deze sensor?
4 Hoe groot zal de signaalspanning van de sensor vermoedelijk zijn bij 0 °C?
5 Bepaal de richtingscoëfficiënt (het hellingsgetal) van de ijkgrafiek.

**Conclusie**
6 Beantwoord de onderzoeksvraag.

## EXPERIMENT 2 Een stil alarm (onderzoekspracticum)

**Inleiding**
Alarmsystemen zijn bekende voorbeelden van automatische systemen. Denk aan een buitenlamp die ’s avonds aangaat als er iemand voor de deur staat, of aan een stil inbraakalarm dat bij inbraak een lichtsignaal geeft.

**Onderzoeksvraag**
Hoe bouw je een stil alarm dat reageert op geluid, een knipperend lichtsignaal geeft en weer kan worden uitgezet?

**Benodigdheden**
Geen verdere benodigdheden.

**Uitvoering**
- Bouw een schakeling op het systeembord die aan de volgende eisen voldoet:
  – Het alarm moet afgaan als er een hard geluid klinkt (en dus niet bij een zacht geluid).
  – Als het alarm afgaat, begint er een led te knipperen die steeds 4 s aan is en dan weer 4 s uit is.
  – Het knipperen van de led blijft doorgaan tot er iemand op een drukknop drukt.
- Controleer je schakeling.

**Verwerking**

1 Welke onderdelen van het systeembord heb je nodig?
2 Heb je een meet-, stuur- of regelsysteem gebouwd?

**Conclusie**
3 Beantwoord de onderzoeksvraag.
4 Maak een tekening van de schakeling waarin je alleen de gebruikte onderdelen laat zien.

## EXPERIMENT 3 Automatische temperatuurregeling (begripspracticum)

**Inleiding**
In bijvoorbeeld ovens en couveuses is het belangrijk dat de temperatuur zo goed mogelijk op een bepaalde waarde wordt gehouden. Dat kan met een regelsysteem.
Je gaat een systeem bouwen dat de temperatuur van een bekerglas met water constant moet houden.

**Onderzoeksvraag**
Is het mogelijk met behulp van het systeembord de temperatuur van een bekerglas met water constant te houden?

**Benodigdheden**
voeding; bekerglas; roerstaaf; verwarmingselement met voeding; temperatuursensor

**Uitvoering**
- Bouw een schakeling met het systeembord dat het volgende doet:
  – Als de temperatuur in een bekerglas met water onder de 30 °C komt, dan moet het verwarmingselement dat in het bekerglas hangt aangaan.
  – Als de temperatuur boven de 30 °C komt, dan moet het verwarmingselement weer uitgaan.
- Controleer je schakeling.

**Tips**
- Gebruik het ijkdiagram dat je in experiment 1 hebt gemaakt.
- Sluit het verwarmingselement en zijn voeding aan op het relais.
- Als je geen sensor kunt gebruiken, boots deze dan na met de variabele spanning op het systeembord. Kies dan zelf een spanning die bij 30 °C hoort.

### Verwerking

**1** Is de regeling van de temperatuur van het water in het bekerglas een proportionele regeling?
**2** Waarom zal het nooit lukken om de temperatuur exact op 30 °C te houden?
**3** Heb je een meet-, stuur- of regelsysteem gebouwd?

**Conclusie**
**4** Beantwoord de onderzoeksvraag.

Je docent beslist of je de volgende experimenten uitvoert volgens de instructies of dat je de uitgebreide omschrijving krijgt.

## EXPERIMENT 4 De AD-omzetter (apparatuurpracticum)

**Inleiding**
Apparaten die met computerchips werken, kunnen alleen binaire signalen verwerken. Daarom is een AD-omzetter belangrijk: die kan analoge signalen in discrete omzetten.

**Onderzoeksvraag**
Op welke manier zet de AD-omzetter van het systeembord analoge signalen om in discrete signalen?

## ONDERZOEK Flessenteller

**Inleiding**
In paragraaf 2 staat een opdracht over een systeem dat flessen telt die op een lopende band voorbijkomen (opdracht 10).
Je gaat nu zelf met het systeembord een goed werkende flessenteller bouwen.

**Praktisch**
- Je mag ook andere objecten kiezen om te tellen.
- Een echte lopende band zou mooi zijn, maar je mag de objecten ook met de hand langs de teller bewegen.

# Antwoorden

Hier vind je de numerieke antwoorden op de vragen in het boek.
De volledige uitwerkingen staan in het uitwerkingenboek.

## 4 Materialen

### Praktijk

| | | |
|---|---|---|
| 2 | c | 3× groter |
| 3 | b | $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ N |

### Theorie

| | | |
|---|---|---|
| 4 | a | $1{,}135 \cdot 10^{4}$ kg m$^{-3}$ |
| | b | 7,87 g cm$^{-3}$ |
| | c | $9{,}982 \cdot 10^{-4}$ kg m$^{-3}$ |
| | d | 1,293 g L$^{-1}$ |
| | e | $7{,}90 \cdot 10^{2}$ g L$^{-1}$ |
| 5 | | $2{,}70 \cdot 10^{-1}$ kg |
| 6 | | 24 m |
| 7 | | 2,1 kg |
| 9 | b | 8,99% |
| +10 | b | $1{,}4 \cdot 10^{2}$ cm$^{3}$ |
| 12 | a | $2{,}0 \cdot 10^{3}$ N m$^{-1}$ |
| | b | 50 N cm$^{-1}$ |
| | c | $6{,}70 \cdot 10^{3}$ N cm$^{-2}$ |
| | d | $2{,}28 \cdot 10^{6}$ N m$^{-2}$ |
| | e | $4{,}0 \cdot 10^{8}$ N m$^{-2}$ |
| 13 | b | $1{,}6 \cdot 10^{2}$ N cm$^{-1}$ |
| 14 | b | 3× de oorspronkelijke lengte |
| 15 | a | $3{,}5 \cdot 10^{6}$ N m$^{-2}$ |
| | b | 0,010 |
| | c | 1,0% |
| | d | $3{,}5 \cdot 10^{8}$ N m$^{-2}$ |
| 16 | | $9{,}0 \cdot 10^{6}$ N m$^{-2}$ |
| 17 | | $9{,}5 \cdot 10^{2}$ kg |
| 18 | a | 2× groter |
| | b | blijft gelijk |
| | c | 4× kleiner |
| | d | 4× kleiner |
| +19 | a | 6,0 N cm$^{-1}$ |
| | b | 0,27 cm |
| | c | 18 N cm$^{-1}$ |
| +20 | a | $5{,}2 \cdot 10^{3}$ m |
| | b | $8{,}9 \cdot 10^{2}$ kg m$^{-3}$ |
| 22 | a | 273 K |
| | b | –273 °C |
| | c | 373 K |
| | d | –173 °C |
| 23 | | 60 K |
| 24 | | $4{,}1 \cdot 10^{5}$ J |
| 25 | | 32 °C |
| 26 | a | $6{,}8 \cdot 10^{6}$ J |
| | b | $3{,}4 \cdot 10^{3}$ s |
| 27 | d | $209 \cdot 10^{3}$ J |
| | e | $668 \cdot 10^{3}$ J |
| 28 | b | $3{,}6 \cdot 10^{6}$ J |
| 29 | b | $c_A$: $2{,}4 \cdot 10^{3}$ J kg$^{-1}$ K$^{-1}$ |
| | | $c_B$: $1{,}8 \cdot 10^{3}$ J kg$^{-1}$ K$^{-1}$ |
| +31 | a | $8{,}36 \cdot 10^{3}$ J |
| | b | 287 g |
| 35 | a | $2 \cdot 10^{3}$ W |
| | c | $2 \cdot 10^{3}$ W |
| 36 | b | 0,091 m$^{3}$ |
| 38 | c | 13 W |
| | e | 0,043 W m$^{-1}$ K$^{-1}$ |
| | f | 19 cm |
| 39 | d | $1{,}5 \cdot 10^{5}$ S K W$^{-1}$ |
| +40 | a | 101 °C |
| 42 | a | $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ mm |
| | b | $5{,}1 \cdot 10^{6}$ m$^{3}$ |
| 43 | | $4{,}3 \cdot 10^{-2}$ mm × $4{,}3 \cdot 10^{-2}$ mm |
| 46 | a | $2{,}17 \cdot 10^{-3}$ kg (= 2,17 g) |
| | b | Na: $3{,}818 \cdot 10^{-26}$ kg |
| | | Cl: $5{,}887 \cdot 10^{-26}$ kg |
| | c | $2{,}24 \cdot 10^{22}$ |
| 47 | a | $1{,}8 \cdot 10^{9}$ N m$^{-2}$ |
| | b | $3{,}3 \cdot 10^{10}$ N m$^{-2}$ |
| | c | 36 kN |
| | d | 422 mm |
| | f | $2{,}2 \cdot 10^{2}$ kg |
| | g | $9{,}5 \cdot 10^{2}$ W |
| | | composietmateriaal: |
| | | $1{,}4 \cdot 10^{2}$ W |
| | | steenwol: $1{,}4 \cdot 10^{2}$ W |

## 5 Arbeid en energie

### Praktijk

| | | |
|---|---|---|
| 3 | | $9{,}9 \cdot 10^{4}$ MJ |
| 4 | a | $3{,}3 \cdot 10^{11}$ kg |
| | b | $1 \cdot 10^{13}$ J |
| | c | $1 \cdot 10^{8}$ W |
| | d | $4 \cdot 10^{1}$ h |

### Theorie

| | | |
|---|---|---|
| 3 | | $1{,}6 \cdot 10^{3}$ N |
| 4 | | 0,51 m |
| 5 | a | 141 J |
| | b | –141 J |
| | c | 0 J |
| | d | 141 J |
| 7 | a | $5{,}8 \cdot 10^{12}$ J |
| 8 | | $4{,}2 \cdot 10^{5}$ J |
| 9 | b | 0,40 N |
| | c | $3{,}2 \cdot 10^{-2}$ J |
| | d | $1{,}8 \cdot 10^{-2}$ J |
| 15 | a | $2{,}4 \cdot 10^{3}$ J |
| | b | $6{,}1 \cdot 10^{2}$ J |
| 16 | a | 18× zo groot |
| | b | 6× zo groot |
| 17 | | B |
| 18 | a | $4{,}7 \cdot 10^{2}$ J |
| | b | $-4{,}3 \cdot 10^{2}$ J |
| 19 | a | $6{,}96 \cdot 10^{15}$ J |
| 20 | a | $1{,}16 \cdot 10^{-4}$ kg |
| | b | $1{,}9 \cdot 10^{3}$ J |
| | c | 52 mL |
| 21 | a | $1{,}5 \cdot 10^{7}$ J kg$^{-1}$ |
| | b | 4,1 kWh kg$^{-1}$ |
| 22 | a | $3{,}3 \cdot 10^{7}$ J |
| | b | $7 \cdot 10^{7}$ J |
| 23 | | 5,4 km |
| 24 | | $1{,}08 \cdot 10^{8}$ J |
| 26 | a | 8,9 m s$^{-1}$ |
| | b | 8,3 m s$^{-1}$ |
| | c | 11 m s$^{-1}$ |
| 27 | a | 0,50 m |
| | b | $1{,}7 \cdot 10^{3}$ m s$^{-1}$ |

28 10,0 m
29 a 6,8 J
b 5,6 m $s^{-1}$
30 46,5 m $s^{-1}$
31 a 320 m
b 71 km $h^{-1}$
32 $1{,}0 \cdot 10^5$ N
33 a 25 N
b 8,7 m $s^{-1}$
+34a 1,4 N
b $-8{,}4 \cdot 10^2$ J
c $s = 0$ m: $E_{k,eind} = 837{,}5$ J
$s = 600$ m: $E_{k,eind} = 0$ J
38 a: 5,00 J
b: 0,19 J
c: 6,00 J
39 a 82 m
b 68 m
40 a 46,5 m $s^{-1}$
41 a 447 J
b $3{,}2 \cdot 10^3$ N
42 a 19,8 m $s^{-1}$
b 20,2 m $s^{-1}$
c 20,2 m $s^{-1}$
d 20,2 m $s^{-1}$
43 a 0,024 J
b 0,024 J
44 a $1{,}0 \cdot 10^3$ m
b 19 620 J
+45a $1{,}4 \cdot 10^2$ J $kg^{-1}$ $°C^{-1}$
b $1{,}28 \cdot 10^2$ J $kg^{-1}$ $°C^{-1}$
47 37 W
48 $1{,}0 \cdot 10^6$ W
49 57 W
50 a 1,75 m
b $4{,}1 \cdot 10^3$ W
c 6,0 m $s^{-1}$
51 a $1{,}6 \cdot 10^6$ W
52 a 63%
b 38 N
53 $2{,}7 \cdot 10^2$ s
54 a $1{,}3 \cdot 10^4$ J
b 720 N
55 a $1{,}1 \cdot 10^{15}$ J
b $3{,}3 \cdot 10^{17}$ J
d $2{,}2 \cdot 10^7$ J
e 49 m $s^{-1}$
f $8{,}33 \cdot 10^8$ W
g 3,3 mm

# 6 Spiegels en lenzen

## Praktijk

2 a 17 mm

## Theorie

8 1,3
9 26°
11 a 1,72
b 3,28 dpt
+12 $6{,}6 \cdot 10^{-2}$ m
20 b 1,5
21 a 2,0
b 0,013
c 0,036 m
d 0,38 m
22 a $7{,}7 \cdot 10^{-4}$
b 36 m
23 a 14 m
b 0,12 m
c 9 mm
24 82 mm
25 $2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m
26 1 mm
+27 $1{,}4 \cdot 10^9$ m
28 b $r = 4{,}6$ cm
c 2,3 cm
d 12 dpt

# 7 Technische automatisering

## Theorie

5 e $1{,}00 \cdot 10^3$ J $kg^{-1}$ $K^{-1}$
f 943 s
g tussen 21,6 °C en 22,2 °C
10 b 148 lux ($1{,}5 \cdot 10^2$ lux)
c 0,018 V $lux^{-1}$
d 0 tot 150 lux
+11b NTC: 2,8 V
weerstand: 2.2 V
14 a 1101110
b 6
15 b 256
c 0,0195 V (0,020 V)
+16b 0,7 m $s^{-1}$
c 0,1 m
22 a 9
b 15
c 6
d 2 Hz
25 b 51 slagen per minuut
c 0,001 56 mV (per bit)
f 0,0066 V $hPa^{-1}$
g comparator 1: 1,3 V
comparator 2: 0,70 V

# Register

# Colofon

**Auteurs**
Rick Cremers
Louis Lenders
François Molin

**Eindredactie**
Emile Verstraelen

**Met medewerking van**
Fons Alkemade
Bart-Jan van Lierop

**Ontwerp**
Uitgeverij Malmberg, 's-Hertogenbosch

**Foto omslag**
Shutterstock / Maximusmeridi

**Opmaak**
Nieuwe Stijl, Den Haag

**Opmaak Release**
Pointer grafische vormgeving, Geldrop

**Beeldverwerving**
B en U International Picture Service, Amsterdam

**Illustraties**
Erik Eshuis Infographics, Groningen: p. 94 o, 95, 135 o
Herman Sittrop Grafisch Realisatiebureau, Rotterdam: overige illustraties

**Foto's**
ANP Foto / Vincent Jannink: p. 50
Shutterstock: p. 5, 9, 10 o, 41, 53, 83, 86, 93, 136, 137 lb, rb, 138
Science Photo Library / ANP Foto, Den Haag: p. 43
Getty Images: p. 57, 132
Hollandse Hoogte, Den Haag: p. 8, 49, 53, 88 b, 137 ro
Visual Photo Design, Weurt: p. 32, 34, 133, 140, 146, 151, 154
Thijs Schouten: p. 10 b
Dr. Edward Laitila, Michigan Technological University Dept of Materials Science and Engineering: p. 21
iStockphoto: p. 52, 96
Dreamstime: p. 71
Examen HAVO 2006-1: p. 88 o
Pim Rusch Fotografie, Leiden: p. 100
Examen HAVO 2007-2: p. 127
Offgridweb.com: p. 128

ISBN: 978 94 020 6874 0
Release 2021, eerste oplage

MALMBERG

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471, en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.
© Malmberg 's-Hertogenbosch

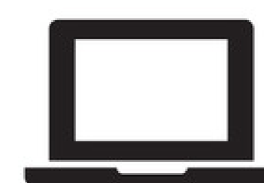
MAX



**Je mag dit boek houden.**
**Handig als naslagwerk.**



**Je mag in dit boek schrijven**
**en aantekeningen maken.**



**Je hebt ook toegang tot**
**de online leeromgeving.**

**AUTEURS**
Rick Cremers
Louis Lenders
François Molin

**EINDREDACTIE**
Emile Verstraelen

**MET MEDEWERKING VAN**
Fons Alkemade
Bart-Jan van Lierop

ISBN 978 94 020 6874 0




596134

MALMBERG